



Rötning av avloppsslam vid 35, 55 och 60 °C

Utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och PAH

Kjerstadius, Hamse; la Cour Jansen, Jes ; Stålhandske, Liselotte; Eriksson, Eva; Olsson, Mikael Emil; Davidsson, Åsa

Publication date:
2012

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Kjerstadius, H., la Cour Jansen, J., Stålhandske, L., Eriksson, E., Olsson, M. E., & Davidsson, Å. (2012). *Rötning av avloppsslam vid 35, 55 och 60 °C: Utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och PAH*. Svenskt Vatten Utveckling. http://vav.griffel.net/filer/SVU-rapport_2012-15

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Rötning av avloppsslam vid 35, 55 och 60 °C

*Hamse Kjerstadius
Jes la Cour Jansen
Liselotte Stålhandske
Eva Eriksson
Mikael Olsson
Åsa Davidsson*



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Agneta Granberg, ordförande | Göteborgs Stad |
| Daniel Hellström, sekreterare | Svenskt Vatten |
| Henrik Aspegren | VA SYD |
| Per Ericsson | Norrvatten |
| Stefan Johansson | Skellefteå kommun |
| Henrik Kant | Göteborg Vatten |
| Lena Ludvigsson-Olafsen | Smedjebackens kommun |
| Lisa Osterman | Örebro kommun |
| Kenneth M. Persson | Sydvatten AB |
| Lars-Gunnar Reinius | Stockholm Vatten AB |
| Bo Rutberg | Sveriges Kommuner och Landsting |
| Lena Söderberg | Svenskt Vatten |

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan återopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

| | |
|---------------------------------|--|
| Rapportens titel: | Rötning av avloppsslam vid 35, 55 och 60 °C – Utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och PAH |
| Title of the report: | Digestion of sludge at 35, 55 och 60 °C – Evaluation of hygienization, biogas production and reduction of pharmaceuticals and PAH |
| Rapportnummer: | 2012-15 |
| Författare: | Hamse Kjerstadius och Åsa Davidsson, Lunds Tekniska Högskola. Liselotte Stålhandske, VA SYD. Eva Eriksson och Mikael Olsson, Danmarks Tekniske Universitet. Jes la Cour Jansen, Lunds Tekniska Högskola |
| Projektnummer: | 10-127 |
| Projektets namn: | Rötning av slam vid 35, 55 och 60 °C – Utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och andra industrikemikalier |
| Projektets finansiering: | Svenskt Vatten Utveckling, Lunds Tekniska Högskola, VA SYD, Danmarks Tekniske Universitet och Umeå Universitet |
| Rapportens omfattning | |
| Sidantal: | 78 |
| Format: | A4 |
| Sökord: | Avloppsslam, anaerob, hygienisering, patogen, pastörisering |
| Keywords: | Sewage sludge, anaerobic, hygienization, pathogen, pasteurization |
| Sammandrag: | Studien har undersökt effekt av rötning (35, 55 och 60 °C) med olika exponeringstid respektive pastörisering på hygienisering av patogener, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och PAH |
| Abstract: | The study evaluated effect of anaerobic digestion (35, 55 and 60 °C) at different minimum exposure times as well as from pasteurization on hygienization of pathogens, biogas production and removal of pharmaceutical substances and PAH |
| Målgrupper: | Driftsansvarig personal vid avloppsreningsverk samt arbetande inom FoU med VA-teknik |
| Omslagsbild: | Biogasreaktorer som användes vid försöket. Foto: Hamse Kjerstadius, VA-teknik LTH |
| Rapport: | Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se |
| Utgivningsår: | 2012 |
| Utgivare: | Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB |

Förord

Detta projekt har utförts med anledning av förordningsförslag som lades fram av Naturvårdsverket i rapporten Uppdatering av "Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp" år 2010. Förordningsförslaget inkluderar föreslagna metoder för hygienisering av slam i avseende på indikatororganismer för patogener. Bland föreslagna metoder finns rötning med olika kombinationer av temperatur och exponeringstid. Några av dessa kombinationer (framförallt rötning vid 60 °C) skiljer sig avsevärt från vad som idag tillämpas vid slamrötning på kommunala avloppsreningsverk och därför är det intressant att undersöka dessa metoder närmare och jämföra dem med mer "konventionella" processer.

Studien utfördes av Åsa Davidsson, Hamse Kjerstadius och Jes la Cour Jansen vid VA-teknik, Institutionen för kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola. Extern analys utfördes av VA SYD, Statens Veterinärmedicinska Anstalt (SVA), Kemiska institutionen vid Umeå Universitet (UU) samt Institut for Vand og Miljøteknologi vid Danmarks Tekniske Universitet (DTU). Resultaten från extern analys av mikroorganismer presenteras i fullständig form i Appendix B tillsammans med självständigt utlåtande och diskussion från SVA.

Stort tack riktas till VA SYD som tillhandahöll lokaler och material. Vidare tackas Salar Haghighatafshar som utförde exemplariskt arbete och praktisk "trouble-shooting" kring reaktorskötsel och försök. Ann Albiñ och Josefine Elving vid Statens Veterinärmedicinska Anstalt tackas för starkt bidrag kring diskussioner kring analysmetoder för mikrobiologisk analys och utvärdering av resultat. Jerker Fick vid Kemiska institutionen vid Umeå Universitet tackas för värdefulla diskussioner kring analys av läkemedel i slam och avloppsvatten. Christina Maj Hagberg, Hilla Wachtmeister, Mie Barrett Sørensen och Cecilie Møller Kudahl tackas för deras insats vid kemiska analyser och gröningshämningförsök.

Författarna

Innehåll

| | |
|--|-----------|
| Förord..... | 3 |
| Sammanfattning | 6 |
| Summary..... | 7 |
| Förkortningar..... | 8 |
| 1 Introduktion | 9 |
| 2 Syfte..... | 10 |
| 3 Genomförande | 11 |
| 4 Bakgrund..... | 12 |
| 4.1 Juridisk bakgrund | 12 |
| 4.2 Hygiensieringseffekt av rötning | 14 |
| 4.3 Rötning vid 60 °C | 15 |
| 4.4 Metanproduktion vid termofil temperatur samt efter pastörisering..... | 16 |
| 4.5 Läkemedelsrester i avloppsvatten..... | 16 |
| 4.6 PAH och PCB | 17 |
| 5 Kontinuerligt rötförsök | 19 |
| 5.1 Försökuppställning | 19 |
| 5.2 Tidslinje för rötförsök | 19 |
| 5.3 Uppstart och drift av reaktorer | 20 |
| 6 Resultat och diskussion | 24 |
| 6.1 Driftsstabilitet vid provtagning | 24 |
| 6.2 Processtabilitet och metanproduktion vid 60 °C..... | 25 |
| 6.3 Hygieniseringseffekt av rötning och pastörisering | 26 |
| 6.4 Förekomst och reduktion av läkemedelsrester..... | 32 |
| 6.5 PAH och PCB | 35 |
| 6.6 Groningshämning | 37 |
| 6.7 Energibalans | 38 |
| 7 Slutsatser | 40 |
| 8 Referenser..... | 41 |
| Appendix | 46 |

Sammanfattning

Förordningar och direktiv i Sverige och EU rörande användning av slam på åkermark är under revision och striktare reglering kan väntas i framtiden. Inom både EU och Sverige föreslås att slam bör hygieniseras i avseende på innehåll av patogener och gränsvärden för indikatororganismer föreslås i arbetsdokumentet kring EU:s slamdirektiv och Naturvårdsverkets förordningsförslag från 2010.

Denna studie undersökte hygieniseringseffekten av anaerob behandling vid 35, 55 och 60 °C för olika minsta exponeringstider i röt-kammaren samt effekten av pastörisering vid 70 °C under 60 minuter. I samband med detta utfördes en energibalans över olika hygieniseringssteg vid reningsverk. Vidare undersöktes effekten av rötning och pastörisering på reduktion av läkemedel, polycykliska aromatiska kolväten (PAH) samt gröningshämmning av kornfrö som gödslats med slam.

Resultaten visar på otillräcklig hygienisering från rötning vid 35 °C men god hygienisering för termofila temperaturer (55 och 60 °C) samt för pastörisering. Resultaten visar att 2 h exponeringstid är tillräckligt för samtliga termofila temperaturer för att uppnå de av Naturvårdsverket föreslagna gränsvärdena för *Salmonella* och *E.coli*. För att kunna fastställa om slamprover ligger under det föreslagna gränsvärdet för enterokocker behöver dock prover centrifugeras varpå analysmetoden frångås. Det kan således inte fastställas att rötning vid termofila temperaturer klarar av gränsvärdet för enterokocker även om data från centrifugerade prover pekade mot detta. Energibalansen för olika hygieniseringssteg visade att pastörisering följt av mesofil rötning ger den högsta energivinsten om 20 % ökad metanproduktion sker. Om ingen ökad metanproduktion sker är termofil rötning vid 55 °C mest gynnsamt. Vidare visade studien att läkemedel inte generellt reduceras under rötning vid någon undersökt temperatur eller vid pastörisering. I enskilda fall kan viss reduktion ske men denna kan inte fastställas på grund av den mycket höga mätosäkerheten på slamprover. PAH reducerades inte generellt vid rötning eller pastörisering men reducerades i tre enskilda fall till viss del vid rötning. Studien visade även att rötat slam gav lägre hämning av korngrodd än obehandlat eller pastöriserat slam.

Summary

Current regulations and directives in Sweden and the EU regarding the use of sludge in agriculture is under revision and stricter regulation can most likely be expected in the future. In both the EU and Sweden hygienization of sludge in regards to pathogens is proposed and concentrations limits for pathogenic indicator organisms are suggested in the working document on sludge and biowaste (related to the EU sludge directive) and the Swedish Environmental Protection Agency's regulation proposal from 2010.

This study evaluated the effect of hygienization from anaerobic digestion at 35, 55 and 60 °C for different minimum exposure times in the digester and from pasteurization at 70 °C for 60 minutes. In addition an energy balance was carried out over the different methods of hygienization at wastewater treatment plants. Also, the effect of digestion and pasteurization on the reduction of pharmaceutical residues, PAHs and inhibition of sprouting of barley seed fertilized with sludge were investigated.

The results shows that digestion at 35 °C renders inadequate hygienization in regards to both the limits suggested for the EU and by the Swedish EPA. Results from digestion at thermophilic temperatures (55 and 60 °C) with minimum exposure times of 2 h could be shown to pass the suggested limits for *Salmonella* and *E.coli*. Furthermore the results suggest that 2 h minimum exposure time is sufficient for all thermophilic temperatures to achieve the limits proposed by the Swedish EPA in regards to enterococci. However since the detection limit for enterococci is too high with the current analytical method sludge samples need to be centrifuged before analysis. This deviates from the method of analysis and thus guaranteed hygienization could not be proven in regards to enterococci. The energy balance for different methods of hygienization showed that pasteurization followed by mesophilic digestion produces the highest energy gain if 20 % increase in methane production occurs. If no increase in methane production occurs thermophilic digestion at 55 °C is the best method from an energy perspective. Furthermore, the study showed that pharmaceutical residues not generally are reduced during digestion at any investigated temperature or by pasteurization. In individual cases, some reduction occurs but this cannot be determined due to the low accuracy when analyzing sludge samples. PAHs are generally not reduced during digestion or pasteurization, but were reduced to a lesser degree during digestion in three individual cases. The study also showed that the digested sludge gave lower inhibition of barley seed root elongation than untreated or pasteurized sludge

Förkortningar

| | |
|------|--|
| CFU | Colony forming unit. Enhet för räkning av mikroorganismer vid mikrobiell analys. Vid odling erhålls kolonier av mikroorganismer men dessa antas (på grund av provbehandling) härstamma från en enskild mikroorganism och betecknas då som CFU. |
| CSTR | Continuously stirred tank reactor. Konventionell typ av rötkammare vid reningsverk. |
| HRT | Hydraulisk retentionstid (Hydraulic retention time). Medelvärde för uppehållstid i rötkammare. Anges i dygn. |
| OLR | Organisk belastning (Organic loading rate). Mått på mängd organisk material som tillförs rötkammare vid inmatning. Anges i $\text{kg VS} / (\text{m}^3 \cdot \text{dygn})$ |
| TS | Torrsubstanshalt (Total solids). Koncentration av torrmasa i ett prov. Anges som procent av massa våtvikt. |
| VS | Glödförlust (Volatile solids). Mått på koncentration av organiskt material i ett prov. Anges som procent av massa våtvikt. |

1 Introduktion

Inom Sverige och EU pågår arbete kring att uppdatera de förordningar respektive direktiv som behandlar användandet av avloppsslam på jordbruksmark. Naturvårdsverket har på uppdrag av miljödepartementet uppdaterat sitt tidigare dokument "Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp" och den uppdaterade versionen innehåller ett reviderat förordningsförslag om användandet av avloppsfraktioner på mark (Naturvårdsverket, 2010). Enligt förslaget skall avloppsfraktioner som skall användas på och i mark hygieniseras i avseende på patogener enligt angivna metoder, eller likvärdiga behandlingar, för att reducera innehåll av indikatororganismer i slammet till angivna gränsvärden. I definitionen för avloppsfraktioner ingår slam från avloppsreningsverk varför förordningsförslaget i hög grad berör hantering av slam vid avloppreningsverk.

Förordningsförslaget anger även hygieniseringsmetoder för att nå de uppsatta gränsvärdena för innehåll av indikatororganismer. Bland dessa metoder återfinns pastörisering av slam vid 70 °C under 60 minuter respektive termofil rötning i området 55–60 °C vid olika exponeringstider. Pastörisering har visats mycket effektivt som hygieniseringsmetod men är kostsamt och kräver nyinvesteringar vid reningsverk som totalt på nationell nivå beräknats kosta upp mot 500 MSEK (Naturvårdsverket, 2010). Omställning av avloppsreningsverk till termofila rötprocesser kan därför vara ett ekonomiskt alternativ och termofil rötning har tidigare visats ha god patogenreducerande effekt (Olsen & Larsen, 1987; Sahlström, 2003; Watanabe, 1997). Det finns dock en brist på undersökningar kring patogenreducering vid de av Naturvårdsverket föreslagna kombinationerna av temperatur och exponeringstid. Det är särskilt intressant att fastställa de minsta exponeringstiderna som krävs för att uppnå fullgod hygienisering till föreslagna gränsvärden.

Vidare finns det andra aspekter än hygienisering att ta hänsyn till vid omställning till termofil temperatur. Driftsstabilitet och biogasproduktion är viktiga parametrar men även eventuell ökad reduktion av läkemedelsrester och organiska mikroföroreningar som återfinns i avloppsslam bör utvärderas. Utvärdering är särskilt av intresse för den föreslagna driftstemperaturen 60 °C för vilken ringa tidigare erfarenhet från rötning av slam finns (Scherer et al., 2003; Nozhevnikova et al., 1999; Ahring et al., 2001).

Det behöver alltså utvärderas hur effektiv reduktionen av patogener är vid de av naturvårdsverket angivna hygieniseringsmetoderna men även hur dessa metoder påverkar reduktion av andra föroreningar samt driftsstabilitet, energiförbrukning och biogasproduktion.

2 Syfte

Projektets syfte var att utvärdera om rötning av slam vid 60 °C går att etablera och driva stabilt för att säkerställa de av Naturvårdsverket föreslagna gränsvärdena för indikatororganismer. Vidare skulle det i projektet fastställas om rötning vid 60 °C ger en signifikant bättre hygienisering än rötning vid 55 °C, vilket skulle kunna motivera en kortare exponeringstid vid hygienisering, samt om utrötning och metanproduktion ger så mycket energivinster att rötning vid högre temperatur kan motiveras. Dessutom värderas om exponeringstider på 2–2,5 h ger signifikant sämre hygienisering än rötning vid längre exponeringstid.

Projektet syftar ytterligare till att utvärdera om nedbrytningen av läkemedel, polycykliska organiska kolväten (PAH) och polyklorerade bifenyl (PCB) ökar under rötning vid högre temperaturer jämfört med mesofil rötning vid 35 °C samt om groningshämning av kornfrö skiljer sig åt för de olika behandlingsmetoderna.

Avgränsning

Projektets försöksuppställning fokuserar på utvärdering av biogasprocessen vid 60 °C samt reduktion av patogener vid olika temperatur och exponeringstid. Processparametrar, främst temperatur och exponeringstid kan därför vara suboptimala för att utvärdera effekt på läkemedel, PAH, PCB respektive groningshämning.

3 Genomförande

I projektet användes kontinuerliga rötkammare i pilotskala för att driva rötprocesser vid olika temperaturer och hydrauliska uppehållstider. Då drift av dessa konstaterats stabila testades olika exponeringstider varpå slamprover togs. Dessa analyserades för standardparametrar samt mikroorganismer, läkemedel, PAH, PCB, metaller och groningshämning. Driftsparametrar för de reaktorer som användes samt de exponeringstider som utvärderas presenteras i tabell 3-1.

Tabell 3-1 *Driftsparametrar för rötkammare samt utvärderade exponeringstider.*

| Reaktor | Temperatur (°C) | HRT (dygn) | Utvärderade exponeringstider (h) |
|---------|-----------------|------------|----------------------------------|
| R1 | 55 | 15 | 2, 2.5, 6, 24 |
| R2 | 55 | 7 | 2, 2.5, 6, 24 |
| R3 | 60 | 7 | 2, 2.5, 6, 24 |
| R4 | 60 | 15 | 2, 2.5, 6, 24 |
| R5 | 35 | 15 | 2, 2.5, 6, 24 |

Deltagare

Projektet utfördes av vattenförsörjnings- och avloppsteknik (VA-teknik) vid institutionen för Kemiteknik vid Lunds tekniska högskola (LTH) i samarbete med VA SYD, Statens veterinärmedicinska anstalt (SVA), Institut for Vand og Miljøteknologi vid Danmarks tekniska universitet (DTU) samt Kemiska Institutionen vid Umeå universitet (UU).

VA-teknik utförde det praktiska försöksarbetet kring uppställning och drift av försöksreaktorerna samt analys av biogas och driftsparametrar.

VA SYD tillhandahöll försöksutrustning och tillgång till försökslokal vid Sjölanda reningsverk samt utförde beräkningsarbete för energibalanser vid rötning.

Mikrobiell analys utfördes av SVA i Uppsala, läkemedelsrester analyserades vid Kemiska Institutionen vid Umeå universitet, PAH, PCB samt groningshämning analyserades vid Institut for Vand og Miljøteknologi vid DTU.

4 Bakgrund

4.1 Juridisk bakgrund

Lagstiftningen kring återförsel av avloppsslam till mark är reglerad både inom Europeiska Unionen (EU) samt på nationell nivå inom Sverige. Medlemsländer i EU kan frivilligt införa hårdare krav än de i gällande slamdirektiv inom EU. Både inom Sverige och EU kan dags lagstiftning angående spridning av slam på jordbruksmark anses vara utdaterad och revisionsarbete för att förnya dessa pågår också i båda fallen.

Sverige

I Sverige reglerar i dagsläget ett flertal paragrafer, förordningar, föreskrifter och allmänna råd hanteringen och användandet av avloppsslam. Mest relevanta är statens naturvårdsverks kungörelse SNFS 1994:2 med föreskrifter om skydd för miljön, särskilt marken när avloppsslam används inom jordbruket samt förordning SFS 1998:944 i svensk författningssamling som reglerar halter av tungmetaller i avloppsslam. Tillsammans är dessa mer strikta i avseende på hantering av avloppsslam samt halter av tungmetaller än gällande EG-direktiv 86/278/EEG. Det finns dock i dagsläget inga lagstadgade gränsvärden för patogener i avloppsslam i Sverige även om det inom det frivilliga slamcertifieringsprojektet REVAQ finns ett krav på att färdigbehandlat slam skall vara fritt från Salmonella (REVAQ, 2012). Vidare finns gränsvärden för verk som hanterar animaliska biprodukter där gränsvärdena för Salmonella, *E.coli* samt enterokocker i rötrest regleras av förordningarna EG 1069/2009 och EU 142/2011.

I arbetet kring att förnya lagstiftningen gav Naturvårdsverket år 2002 ut rapporten "Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp" vilken innehöll ett förordningsförslag kring slamhantering (Naturvårdsverket, 2002). Förordningsförslaget togs dock inte upp till omröstning och Naturvårdsverket har på uppdrag av regeringen sedan dess presenterat en uppdatering av "Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp" (Naturvårdsverket, 2010) vilken innehåller ett nytt förordningsförslag. Detta föreslås ersätta SNFS 1994:2 och innehåller striktare gränsvärden för tungmetaller i avloppsfraktioner, där slam från avloppsreningsverk inkluderas, respektive gränsvärden för indikatororganismer (Naturvårdsverket, 2010). Anläggningar som hanterar avloppsfraktioner skall även inkludera ett hygieniseringssteg och beroende på dess behandlingsmetod renderas slam av två olika kvalitéer, klass A eller klass B, varav den senare har mer restriktiva användningsområden. Två för den här rapporten relevanta behandlingsmetoder som genererar avloppsfraktioner av klass A är pastörisering under 60 minuter vid 70 °C respektive termofil rötning med en hydraulisk uppehållstid (HRT) på minst 7 dagar vid en av kombinationerna av temperatur och exponeringstid som anges i tabell 4-1 nedan. Med exponeringstid avses minimumtid mellan inmatning av substrat och uttag av rötslam från rötprocessen.

Tabell 4-1 Parametrar som skall uppfyllas för att producera Klass A avfallsfraktioner vid behandling genom termofil rötning. (Naturvårdsverket, 2010).

| Temperatur (°C) | Exponeringstid (h) |
|-----------------|--------------------|
| 52 | 10 |
| 55 | 6 |
| 60 | 2,5 |

Avloppsfraktioner som behandlas enligt klass A skall dessutom efter hygieniseringssteget innehålla Enterokocker <1 000 / g TS samt innan användning uppfylla kraven om Salmonella frånvarande i 25 g våtvikt och *E.coli* < 1 000 / g TS. Dessa indikatororganismer valdes för att de är tåliga mot höga temperaturer (enterokocker), anses ge information om eventuell kontaminering av behandlat slam (Salmonella) respektive är mått på eventuell återväxt av patogener i behandlat slam (*E.coli*) (Naturvårdsverket, 2010). För metod kring provtagning och analys hänvisar Naturvårdsverket till framtida kompletterande vägledning om förordningsförslaget antas samt anger en EU-vägledning gällande provtagning av slam som underlag för detta (EU-SEPP, 2011).

När denna rapport sammanställdes hade Naturvårdsverket fått i uppdrag att se över frågan om återföring av fosfor ytterligare en gång och att föra fram rapport och förordningsförslag till Miljödepartementet i augusti 2013 (Miljödepartementet, 2012). Naturvårdsverket skall även se över frågan om investeringsstöd för tekniker för utvinning av fosfor ur olika fosforresurser.

Europeiska Unionen

Inom EU är gällande direktiv om användandet av avloppsslam i jordbruket 86/278/EEG från 1986 och i denna återfinns gränsvärden för metaller men ej för patogener. Arbete med att förnya direktivet har pågått en längre tid och i en första omgång arbetades ett förslag till revidering ut av det brittiska företaget WRc. I det färdiga förslaget delades behandlingen av slam upp i två behandlingsklasser, avancerad behandling och konventionell behandling (EC, 2001). Den konventionella behandlingen hade som hygieniseringskrav att reducera indikatororganismerna *E.coli* till < 1 000 / g TS samt sporer av *Clostridium perfringens* till < 3 000 / g TS. Utöver dessa krav rekommenderades att den avancerade behandlingsklassen dessutom skulle innehålla krav på en reduktion på minst 4 log10 av tillsatt Salmonella samt att Ascaris ägg skulle bevisas ha blivit icke livskraftiga genom behandlingen. Detta revideringsförslag ratificerades aldrig och i dagsläget finns ett nytt arbetsdokument kring revidering av slamdirektivet. Arbetsdokumentet nämner skärpta regler kring spridning av slam och metallhalter samt förslag på gränsvärden för indikatororganismerna Salmonella och *E.coli* (EC, 2010). Som gränsvärde för Salmonella anges frånvaro i ett prov på 25–50 g behandlat slam och för *E.coli* en reduktion till under $5 \cdot 10^5$ CFU / g våtvikt behandlat slam (EC, 2010). Här står CFU för colony forming unit, dvs. bakteriekolonier som antas ha vuxit från en enskild bakterie. I arbetsdokumentet nämns inga krav på specifik hygieniseringsmetod. De föreslagna gränsvärdena i arbetsdokumentet presenteras tillsammans med de i Natur-

vårdsverkets förordningsförslag i tabell 4-2. Det framgår av tabellen att de senare är mer stringenta än de i arbetsdokumentet kring slamdirektivet i EU.

Tabell 4-2 Föreslagna gränsvärden för patogena indikatororganismer i behandlat slam som skall spridas på åkermark.

| Indikatororganism | Arbetsdokument kring EU:s slamdirektiv (EC, 2010) | Naturvårdsverkets förordningsförslag (Naturvårdsverket, 2010) |
|-------------------|--|---|
| <i>E.coli</i> | < 5 · 10 ⁵ CFU / g våtvikt | < 1 000 / g TS |
| Salmonella | Frånvarande i prov på 25–50 g | Frånvarande i prov på 25 g |
| Enterokocker | - | < 1 000 / g TS |

4.2 Hygieniseringseffekt av rötning

Anaerob nedbrytning har en hygieniserande effekt som främst är beroende av, och ökar med, temperatur och exponeringstid (Olsen & Larsen, 1987; Sahlström, 2003; Watanabe et al., 1997). Vidare menar Sahlström (2003) att reduktionshastigheten av patogener även beror på pH, koncentrationen av fettsyror samt tillgång till näringsämnen. Hygieniseringseffekten skiljer sig dock mellan olika grupper av patogener. Watanabe et al. (1997) fann att rötning vid mesofil temperatur med uppehållstider på 10–30 dygn inte gav någon signifikant reduktion av koliforma bakterier, enterokocker eller Salmonella. Samma studie visade på en kraftig reduktion vid rötning vid 55 °C för uppehållstider på 10 dygn eller mer. Exponeringstiden för båda temperaturerna under försöket var ett dygn.

Sahlström et al. (2004) undersökte reduktionen av patogener vid svenska avloppsreningsverk och fann att termofil rötning vid 55 °C med en hydraulisk uppehållstid (HRT) på 9 dagar reducerade koliforma bakterier, enterokocker och Salmonella kraftigt, men inte totalt, i jämförelse med mesofil rötning vid 34–39 °C och uppehållstider på 14–20 dygn. Dock nämndes inte exponeringstiderna vid respektive reningsverk i studien. Vidare visades att reduktionen av koliforma bakterier var kraftigare än den av enterokocker vid båda temperaturerna samt att *Clostridium perfringens* inte reducerades alls vid mesofil eller termofil temperatur (Sahlström et al., 2004). Detta stämmer även med åsikten i Bagge et al. (2005) och Sahlström (2003) som menar att *Clostridium perfringens* sporformande förmåga gör den extremt tålig och mycket svår att reducera.

I ett annat försök testade Sahlström et al. (2008) effekten av ett pastöriseringssteg i labbskala och fann att vare sig enterokocker, koliforma bakterier, termotoleranta koliforma bakterier eller *E.coli* kunde påvisas efter pastörisering vid 70 °C varken vid 30 eller 60 minuters exponeringstid. Vid samma exponeringstider och en temperatur på 55 °C kunde samtliga patogener påvisas efter 30 minuter men endast enterokocker kunde påvisas efter 60 minuters exponeringstider. Vidare skedde ingen reduktion av *Clostridium perfringens* vid 55 eller 70 °C oavsett exponeringstid.

Bagge et al. (2005) studerade pastöriserande hygieniseringssteg vid fyra svenska fullskaleanläggningar som rötade avfall från djurskötsel. Denna studie visade att förbehandling vid 70 °C under 60 minuter signifikant

reducerade koliforma bakterier, enterokocker samt Salmonella. *Clostridium perfringens* reducerades inte alls i hygieniseringssteget. Vidare fann man i studien att koncentrationerna av patogener ökat efter rötsteget som följde efter pastöriseringen, samt i det efterlagrade slammet. I studien nämns svårigheten att fastställa om patogenerna reducerats totalt med analysmetoden som tänkbar orsak men att ökningen troligtvis berodde på återkontaminering.

4.3 Rötning vid 60 °C

Rötprocessen vid avloppsreningsverk bedrivs oftast vid mesofil temperatur (runt 35 °C) men vid ett antal verk vid termofil temperatur (50–55 °C). Inget avloppsreningsverk i Sverige bedriver dock rötprocessen vid 60 °C varför liten erfarenhet kring rötning av avloppsslam vid 60 °C existerar. Det har dock visats att rötprocesser upp till 70 °C och högre är möjligt men dessa studier har utförts på andra substrat än slam och med andra reaktorer än Continuous stirred tank reactor (CSTR) som konventionellt används vid avloppsreningsverk (Van Lier et al., 2001).

Mer relevanta är studier kring rötning av gödsel av Ahring et al. (2001) respektive Nozhevnikova et al. (1999). Dessa studier visar båda att metanproduktionen sjunker vid temperaturer över 55 °C i kontinuerliga respektive satsvisa försök samt att koncentrationen av fettsyror och vätgasproduktion ökar vid dessa temperaturer. Detta tyder enligt Nozhevnikova et al. (1999) på närvaron av en termofilt anpassad kultur av acidogener. I kontrast till de båda ovanstående studierna visade Scherer et al. (2003) ingen minskad metanhalt eller gasproduktion vid 60 °C jämfört med 37 och 45 °C vid rötning av betensilage i labbskala. Dock fann Scherer et al. (2003) i sin studie att artsammansättningen av metanogener var radikalt annorlunda vid den högre temperaturen samt att denna reaktor återhämtade sig långsammare från en pulsmatning än de vid 37 och 45 °C. Att artsammansättningen hos metanogener förändras vid högre temperaturer stöds av Van Lier et al. (1993) och Zinder (1990) som båda menar att populationen av metanogener genomgår en förändring över 55 °C då populationen gradvis förskjuts från de i kocker växande genuset *Methanosarcina* till genuset *Methanosaeta* (tidigare benämnd *Methanothrix*) som växer i stavform. Författarna är båda överens om att *Methanosarcina* har en högre tillväxthastighet samt ett lägre temperaturoptima kring 55 °C. Vidare menar Zinder i sin artikel att detta genus dokumenterat växer mycket långsammare vid 60 °C och inte alls vid temperaturer över 62 °C. Detta stöds av ett flertal försök nämnda i en tidigare artikel där kulturer av *Methanosarcina* funnits växa mycket långsammare vid 60 °C än vid deras optimala temperatur kring 55–58 °C (Zinder et al., 1984). I denna studie nämns även dominans av *Methanosarcina* bland metanogener trots suboptimala temperaturförhållanden som en tänkbar förklaring för försämrad rötprocess vid temperaturer över 60 °C för rötning av hushållsavfall respektive gödsel (Zinder et al., 1984). Vidare menar både Zinder och van Lier att termofila kulturer av *Methanosaeta* har förmåga att växa vid mycket lägre acetatkoncentrationer än termofila kulturer av *Methanosarcina* (Van Lier et al., 1993; Zinder, 1990). Zinder nämner

koncentrationer på 0,7–1,2 mg acetat / L jämfört med nivåer på 59–148 mg acetat/L för *Methanosarcina*. Vidare nämner Van Lier et al. (2001) att aktiviteten hos propionat- och acetatanvändande mikroorganismer visats sjunka vid temperaturer över 60 °C.

Konkurrenssituationen mellan metanogener och sulfatreducerande bakterier vid 60 °C är också av intresse då dessa grupper av mikroorganismer konkurrerar om substrat varför processparametrar kan främja tillväxt hos den ena gruppen på bekostnad av den andra (Gerardi, 2003). Det är intressant att notera att Ahammad et al. (2008) menar att sulfatreducerande bakterier inte kan växa vid temperaturer över 55 °C vilket även stöds av Zehnder et al. (1988) som menar att endast begränsad närvaro av sulfatreducerande bakterier står att finna över 55 °C.

4.4 Metanproduktion vid termofil temperatur samt efter pastörisering

Mikrobiologin i rötprocessen kan beskrivas som de fyra på varandra följande stegen hydrolys, acidogenes, acetogenes samt metanogenes varav alla utförs av olika grupper av mikroorganismer (Khanal, 2008). Generellt gäller att mikrobiell aktivitet ökar med temperaturen och Gerardi (2003) menar att den mikrobiella aktiviteten kan vara 25–50 % högre vid termofil rötning jämfört med mesofil. Vid ökad processtemperatur kan alltså biogasprocessen ske snabbare och därmed behövs mindre reaktorvolym (Gerardi, 2003; Jarvis et al., 2009). Vidare har Davidsson (2007) visat att rötning av blandslam vid 55 °C och 13 dygns HRT ökade metanproduktionen med 20 % jämfört med rötning vid 35 °C vilket skulle kunna tyda på en ökad metanproduktion vid termofil processtemperatur.

Vid pastörisering hettas substratet i en termisk förbehandlingsprocess upp vilket kan medföra hydrolys av materialet som kan underlätta nedbrytning i rötprocessen. Det finns också många studier som visar på en ökad metanproduktion efter att ett termiskt förbehandlingssteg införs (Gavala et al., 2003; Lu et al., 2008; Wang et al., 1997). I en relevant studie visade Davidsson & la Cour Jansen (2006) att förbehandling av en blandning av primär- och bioslam vid 70°C under 60 minuter med efterföljande mesofil rötning (13 dygns HRT) gav 20 % högre metanproduktion än enbart mesofil rötning av samma substrat.

4.5 Läkemedelsrester i avloppsvatten

Frågan om miljöpåverkan från läkemedelsrester i avlopp har under senare år blivit alltmer aktuell. Inte minst på grund av dokumenterade negativa effekter på akvatiska organismer i recipientvatten från flera läkemedelsrester, främst hormonstörande ämnen, samt debatten om ökad bakterieresistens på grund av kvarvarande antibiotika i utgående slam och vatten från reningsverk. Oftast har forskningen fokuserat på förekomst i utgående vattenfas från avloppsreningsverk men undersökningar har även bedrivits på förekomst i rötslam. Aktuella studier som inkluderar data på det senare är

Naturvårdsverket (2008), Wahlberg et al. (2010) samt Fick et al. (2011). Detta är intressant då läkemedelsrester i olika utsträckning återfinns i slamfas respektive vattenfas vid behandling i avloppsreningsverk (Falås et al., 2012a; Hörsing et al., 2011; Naturvårdsverket, 2008; Zitomer & Speece, 1993).

Det finns i dagsläget inga lagstadgade gränsvärden för läkemedelsrester i utgående vatten eller rötrest från reningsverk men i förslaget till ändring av ramdirektivet för vatten inom EU rekommenderas avloppsreningsverk att hålla läkemedlen Diclofenac, Etinylestradiol och Estradiol under observation (EC, 2012). Naturvårdsverket nämner även kort läkemedelsfrågan och aktuella studier i sin rapport "Uppdatering av aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp" men konkluderar att det behövs mer strukturerad övervakning innan studiernas resultat kan ligga till grund för förslag till reglering (Naturvårdsverket, 2010).

Metoder för att reducera läkemedelsrester har utvärderats sedan ett par år tillbaka. Det har tidigare visats att oxidering med ozon respektive adsorption till aktivt kol är lovande tekniker för att reducera koncentrationer av läkemedelsrester (Alsberg et al., 2009; Naturvårdsverket, 2008). Det är även känt att biologisk behandling kan reducera somliga läkemedel (Naturvårdsverket, 2008; Verlicchi et al., 2012). I studier vid Lunds Universitet visades att reduktion av läkemedel sker över aktivslamsteget i avloppsreningsverk och ännu högre reduktion påvisades under satsvisa försök med biofilmer (Falås et al., 2012a; Falås et al., 2012b). Anaerob behandling, genom rötning, har dock rapporterats ge sämre reduktion än aerob behandling (Naturvårdsverket, 2008; Olofsson, 2012).

4.6 PAH och PCB

De organiska mikroföroreningarna PAH:er (polycykliska aromatiska kolväten) respektive PCB:er (polyklorerade bifenyler) har välkända toxiska och carcinogena egenskaper både för däggdjur och akvatiska organismer (Økland et al., 2005). Båda grupperna inkluderar även svårnedbrytbara ämnen med nedbrytningstider upp till flera år (Naturvårdsverket, 2003; Økland et al., 2005). Vidare är slam den största källan för tillförsel av PAH:er och PCB:er till åkermark enligt Naturvårdsverket varför övervakning av dessa grupper således är intressant för att övervaka risken för spridning till livsmedel och vattenrecipienter (Naturvårdsverket, 2003). I dagsläget finns inga lagstadgade gränsvärden för PAH:er eller PCB:er i slam även om rekommenderade svenska gränsvärden finns (Naturvårdsverket, 1995). Vidare nämns föreslagna gränsvärden för PAH:er i arbetsdokumentet kring revidering av EU:s slamdirektiv (278/86/EEC) (EC, 2010). Naturvårdsverket rekommenderar i sitt förordningsförslag från 2010 inte gränsvärden för dessa grupper utan istället att prioriterade ämnen övervakas i slam och vatten (Naturvårdsverket, 2010). Med prioriterade ämnen avses de som omnämns i EU:s ramdirektiv för vatten (Hedlund, 2012). Ett förslag till förnyelse av dessa ämnen återfinns i det förslag för ändring av ramdirektivet för vatten som publicerades under 2012 (EC, 2012). Detta inkluderar inte PCB, som sedan tidigare är totalförbjudet att använda och vars halter i slam har visats sjunka kraftigt

de senaste decennierna (Clarke et al., 2008; Clarke et al., 2010). Förslaget innefattar dock 8 PAH vilket återges i tabell 4-3 tillsammans med övriga nämnda gränsvärden.

Tabell 4-3 Relevanta dokument som behandlar övervakning och reglering av PAH.

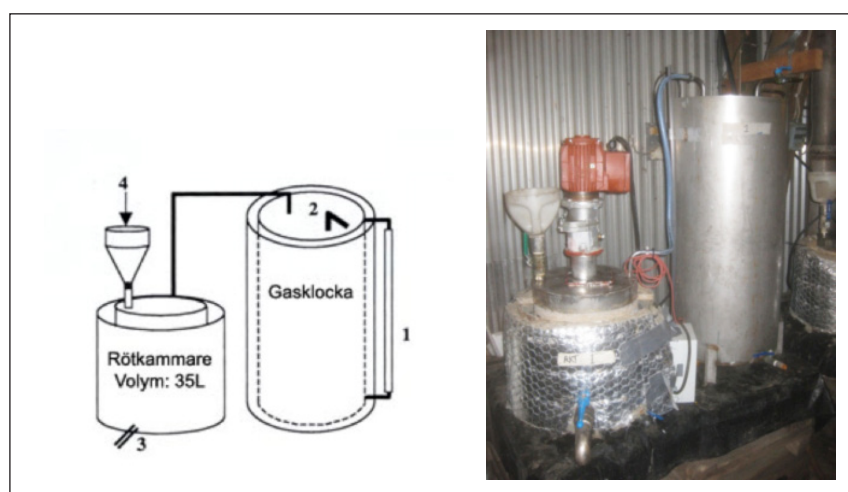
| Ämne | Gränsvärde | Källa | Kommentar |
|--------------------------|----------------|-------------------------|---|
| Σ 6PAH | 3 mg / kg TS | Naturvårdsverket (1995) | Rekommenderat gränsvärde för slam |
| Σ 7PCB | 0,4 mg / kg TS | Naturvårdsverket (1995) | Rekommenderat gränsvärde för slam |
| PAH eller benzo[a]pyrene | - | EC (2010) | Separat utredning pågår |
| PAH | - | EC (2012) | Nämner 8 PAH:er varav 6 identifieras som prioriterade ämnen |

Det är tidigare känt att PAH:er kan brytas ned aerobt och senare studier har även visat att PAH:er kan brytas ned anaerobt (Christensen et al., 2004; Trably et al., 2003). Dessa studier visade även att nedbrytningen ökar med temperaturen med en effektivare reduktion av vissa PAH:er vid termofil rötning (Christensen et al., 2004; Trably et al., 2003). Dock var uppehållstiden i rötkammare eller försökstiden vid anaeroba förhållanden relativt lång i båda studierna (Christensen et al., 2004; Trably et al., 2003). Försök har även visat att förbehandling med ozon ökar reduktion av PAH vid rötning (Bernal-Martinez et al., 2007). Vissa PCB:er har även visats kunna brytas ned både aerobt och anaerobt (Patureau & Trably, 2006).

5 Kontinuerligt rötförsök

5.1 Försöksuppställning

Försöksuppställningen bestod av fem stycken röt-kammare i rostfritt stål kopplade till gasklocka för uppsamlande av biogas, skiss och foto ses i figur 5-1. Röt-kammarna var utrustade med kontinuerlig omrörare och omgärdades av vattenbad för uppvärmning. Uppvärmningsanordning var monterad under röt-kammaren i vattenbadet och reglerad med termostat. Fyra av reaktorerna drevs vid termofil temperatur medan den sista drevs vid mesofil temperatur. Samtliga röt-kammare hade en volym på 35 l varav 20 l var aktiv reaktorvolym. Försöket bedrevs i en lokal på Sjö-lunda avloppsreningsverk (Sjö-lunda ARV) i Malmö.



- 1 – Vattenkolonn för tryckavläsning
- 2 – Gasventil
- 3 – Ventil för utgående rötslam
- 4 – Inmatningsträtt

Figur 5-1 Skiss och foto över en reaktoruppställning.
Foto: Hamse Kjerstadius, VA-teknik LTH.

5.2 Tidslinje för rötförsök

Rötförsöket drevs under totalt 135 försöksdagar mellan 1 juni 2011 till 13 oktober samma år. Försöket delades upp i tre faser; uppstart, kontinuerlig drift samt provtagningsperiod. Under den sistnämnda utvärderades minsta uppehållstider i röt-kammaren (exponeringstider) och prover togs ut för analys av mikroorganismer, läkemedelssubstanser, gröningshämning samt PAH och PCB. Längden på varje fas tillsammans med viktiga driftsförändringar ses nedan i figur 5-2.

| Uppstart (försöksdag 1–54) | | | | | Kontinuerlig drift (försöksdag 55–101) | | | | | Provtagning (försöksdag 102–135) | | | | |
|-------------------------------|----|----|----|----|---|----|---------|----|-----|-------------------------------------|-----|-----|---------|--|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Skötsel vardagar | | | | | Skötsel 7 dagar / vecka | | | | | | | | | |
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | |
| Juni | | | | | Juli | | Augusti | | | September | | | Oktober | |

Figur 5-2 Schema över försöket uppdelat i perioder och med intervallet av skötsel angivet. Ovanför månadsangivelserna anges försöksdag.

5.3 Uppstart och drift av reaktorer

Vid försöksstart drevs reaktorerna 1–4 vid 55 °C och en HRT på 10 dagar. Reaktorerna ympades successivt mellan dag 1–30 med rötslam från två reaktoruppställningar identiska med de som användes i detta försök. Dessa reaktorer hade drivits stabilt i tre månader vid 55 °C och en organisk belastning (OLR) på 2,8 kg VS / (m³ · dygn) med en substratblandning av 75 volymprocent primärslam och 25 volymprocent bioslam från Sjölanda ARV. Reaktor 5 fylldes med 20 l ymp från en mesofil rötkammare i fullskala på Sjölanda ARV vid försöksdag 45 och drevs sedan vid 35 °C och 15 dygns HRT. För samtliga reaktorer i detta försök låg OLR mellan 2,2–2,8 kg VS / (m³ · dygn) under uppstarten.

Mellan försöksdag 34–38 så höjdes temperaturen hos reaktor 3 och 4 med +1 °C / dag upp till 60 °C vilket baserades på litteraturstudier och satsvisa rötförsök. Detta medförde förhöjda koncentrationer av vätesulfid (max 170 ppm) under 10 dagar innan reaktorerna stabiliserades. Vid försöksdag 41 ändrades den hydrauliska uppehållstiden (HRT) för reaktorerna 1–4. Reaktor 1 och 4 ändrades direkt till 15 dygns HRT vilket medförde en sänkning i organisk belastning från 2,4 till 1,6 kg VS / (m³ · dygn). Samma dag började den hydrauliska uppehållstiden för reaktor 2 och 3 att minskas gradvis från 10 dygns HRT till 7 dygns HRT med en hastighet av 1 dygns HRT per vecka vilket medförde en stegvis ökning av OLR från 2,4 till 4,4 kg VS / (m³ · dygn). Uppstarten gick över till kontinuerlig drift vid försöksdag 55 och alla reaktorer drevs därefter vid de hydrauliska uppehållstider och temperaturer som visas i tabell 5-1. Den kontinuerliga driften pågick tills försöksdag 101 då alla reaktorer genomgått minst tre hydrauliska uppehållstider utan förändringar av temperatur eller hydraulisk uppehållstid.

Tabell 5-1 Temperatur och hydraulisk uppehållstid i reaktorerna under rötförsöket.

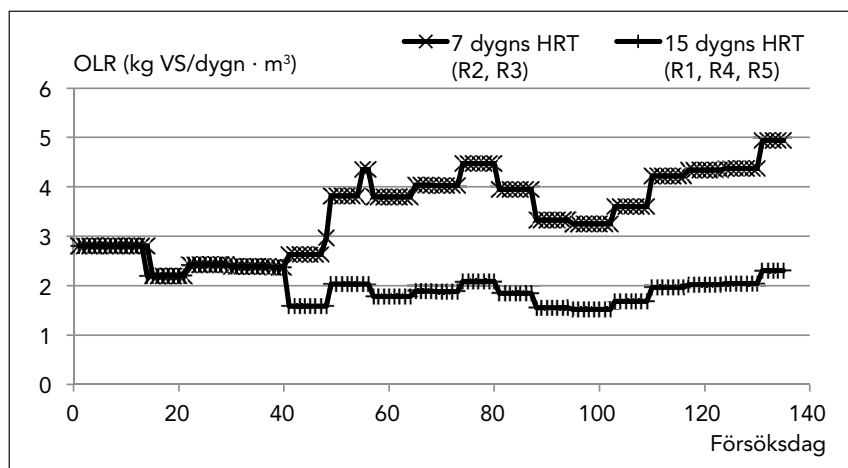
| Reaktor | Temperatur (°C) | HRT (dygn) |
|---------|-----------------|------------|
| R1 | 55 | 15 |
| R2 | 55 | 7 |
| R3 | 60 | 7 |
| R4 | 60 | 15 |
| R5 | 35 | 15 |

Som substrat användes en blandning av 75 volymprocent primärslam och 25 volymprocent bioslam från Sjölanda avloppsreningsverk i Malmö. Verket hanterar främst kommunalt avlopp och har en belastning på strax under 300 000 personekvivalenter (VA SYD, 2010; Sandström, 2012). Slammen (totalt 20 slampartier under hela försöket varav 5 under utvärderingsperioden) hämtades var sjunde dag och förvarades i kylskåp vid 4–6 °C. Nya slampartier analyserades för TS, VS, NH₄⁺-N, total alkalinitet (TA) samt fettsyror, acetat och propionat och variationerna under försöksperioden presenteras i tabell 5-2.

Den organiska belastningen under försöket visas i figur 5-3. Det framgår av figuren att samtliga reaktorer har samma belastning fram till försöksdag 41 eftersom övergången från 10 dygns HRT för samtliga reaktorer startade denna dag.

Tabell 5-2 Substratdata för primärslam och bioslam under rötförsöket.

| Substrat | pH | TS (mass-%) | VS (mass-%) | Total Alkalinitet (mg CaCO ₃ /l) | VFA (mg/l) | NH ₄ ⁺ -N (mg/l) |
|------------|---------|----------------|----------------|--|---|---|
| Primärslam | 5,3–6,3 | 3,2–5,3 | 2,3–3,6 | 1 600–2 200 | Acetat: 670–1 580 Propionat: 410–670 | 30–270 |
| Bioslam | 6,6–7,2 | 2,7–4,8 | 1,9–3,4 | 1 900–3 200 | Acetat: 70–1 050 Propionat: 20–610 | 60–240 |



Figur 5-3 Organisk belastning (OLR) för reaktorerna under hela försöksperioden. Grafen är uppdelad i belastning för reaktorer med 7 dygns respektive 15 dygns hydraulisk uppehållstid (HRT).

Daglig skötsel och analys av driftsparametrar

Skötsel av reaktorerna skedde med 24 h mellanrum under vardagar mellan försöksdag 1–68 (måndagar – fredagar) och med 24 h mellanrum alla veckodagar från försöksdag 69. Skötsel inkluderade i följande ordning gasanalys och nollställning av gasklocka, uttag av rötslam och sist inmatning av substrat. Reaktorvolymen uppmättes med hjälp av tumstock genom inmatningsventilen en gång per vecka varefter korrigering av den aktiva volymen skedde genom att öka eller minska uttaget av rötslam följande dag.

Under hela försöket analyserades biogas, rötslam från respektive reaktor samt örötat slam. Analys av biogasen utfördes dagligen och inkluderade temperatur, gstryck samt gassammansättning (CH₄, CO₂, O₂ samt H₂S) med portabel gasmätare av märket Sewerin SR2-DO. Rötslammets temperatur uppmättes dagligen och innehåll av ammoniumkväve (NH₄⁺-N), total alkalinitet (TA) och de lättflyktiga fettsyror acetat och propionat bestämdes en till två gånger per vecka vid institutionen för kemiteknik vid LTH. Under försökets sista sex veckor analyserades rötslammets torrsubstanshalt (TS) och glödförlust (VS) två gånger per vecka.

Provtagning och analys för mikroorganismer, läkemedel, PAH, PCB och groningshämning

Från försöksdag 102 och framåt startade provtagning med analys av mikroorganismer, läkemedelsrester, PAH, PCB och groningshämning. Samtliga reaktorer hade då stabil drift i avseende på gasproduktion, metanhalt, total alkalinitet samt koncentrationer av ammoniumkväve och fettsyror ace-

tat och propionat. För att utvärdera de olika exponeringstiderna ändrades frekvensen av skötsel från en gång per dygn till en gång per 2, 2.5, 6 eller 24 h beroende på vilken exponeringstid som skulle testas. Denna ändring skedde 24 h innan provtagning vilket enligt beräkningar baserade på en tidigare studie av Haghighatafshar (2011) var tillräckligt för att uppnå nya jämviktskoncentrationer i samtliga termofila reaktorer för de mikroorganismer som skulle analyseras. Dock var detta ej tillräckligt för att uppnå ny jämviktskoncentration för mesofil rötning varför resultat från dessa kan vara lägre än vad som kan förväntas vid drift med exponeringstider under 24 h. Ändring av skötselfrekvensen ändrade också de slamvolymen som tömdes ur reaktorn respektive matades in vid skötsel. Exempelvis så medförde ändring till exponeringstiden 6 h att den inmatade/uttagna slamvolymen vid varje underhåll blev (24 h / 6 h) en fjärdedel av den dagliga. Nedan i tabell 5-3 visas schema för provtagning för analys av mikroorganismer, läkemedelsrester, PAH, PCB och gröningshämning. Nya slampartier under provtagningsperioden hämtades (och började användas) var sjunde dag (försöksdagar 103, 110, 117, 124 och 131).

Tabell 5-3 Provtagningschema för analys av mikroorganismer, läkemedel, PAH, PCB samt gröningshämning. Analys av respektive grupp markeras med X. Benämning med asterisk (*) innebär att slammet centrifugerades samt att analys endast gjordes för enterokocker.

| Datum | Försöksdag | Exponeringstid (h) | Mikro-organismer | Läkemedel | PAH & PCB | Groningshämning |
|--------|------------|--------------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|
| 12-sep | 104 | 24 | X | - | X | X |
| 19-sep | 111 | 24 | X | X | - | X |
| 26-sep | 118 | 6 | - | - | X | X |
| 27-sep | 119 | 6 | X | - | - | X |
| 03-okt | 125 | 2,5 | X | - | X | - |
| 04-okt | 126 | 2 | X | - | X | - |
| 05-okt | 127 | 6 | X | - | - | - |
| 10-okt | 132 | 2,5 | X | - | - | - |
| 11-okt | 133 | 2 | X | - | - | - |
| 11-okt | 133 | 2 | X* | X | - | - |
| 12-okt | 134 | 24 | X* | - | - | - |

Vid provtagning tömdes först 1 l rötslam ur reaktorn för att minimera risken för kontaminering från utloppsventilen. Därefter togs 1 dl prov per reaktor ut och förseglades i plastbehållare varpå prover för mikrobiell analys kylades gradvis till 4 °C under 60 minuter innan de skickades i kylväska för analys. Prover för övriga parameterar frystes till -18 °C innan de skickades för analys. Prover på pastöriserat slam tillreddes genom att råslam i slutna behållare i vattenbad hettades upp till 70 °C varpå denna temperatur hålls i 60 minuter. Därefter kylades prover enligt ovan. Upphettningstiden för att nå 70 °C var 30–40 minuter. Provtagningsprocedurer finns närmare beskriven i Appendix A.

Analys av mikroorganismer skedde inom 24 h efter provtagning och utfördes av Statens veterinärmedicinska anstalt (SVA) i Uppsala. Proverna analyserades för Salmonella, enterokocker, *E.coli*, koliforma bakterier, termotoleranta koliforma bakterier samt *Clostridium Perfringens*. Analysmetoder finns beskrivna i Appendix B.

Analys för 99 läkemedel skedde vid kemiska institutionen vid Umeå Universitet. Analysmetoder finns beskrivna i Appendix C.

Analys för PAH, PCB och gröningshämning utfördes av Institut for Vand og Miljøteknologi vid Danmarks Tekniske Universitet (DTU) i Köpenhamn. PAH- analysen inkluderade naphthalenen, acenaphthene, acenaphthylene, fluorene, phenantrene, anthracene, fluoroanthene, pyrene, chrysene, benzo[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, benzo[a]pyrene, indeno[1,2,3-cd]perylene, benzo[ghi]perylene och dibenzo[a,h]anthracene. Detta inkluderar samtliga PAH som nämns i förslaget till ändring av ramdirektivet för vatten förutom benzo[k]fluoranthene (EC, 2012). PCB-analysen inkluderade PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 och 180. Analys av gröningshämning med slamprover utfördes på kornfrön (*Hordeum vulgare*). Analysmetoder för samtliga analyser utförda vid DTU finns beskrivna i Appendix D.

6 Resultat och diskussion

6.1 Driftsstabilitet vid provtagning

Hur väl provsvaren från rötkammare för analys av mikroorganismer, läkemedelsrester och mikroföroreningar är representativa för drift vid de undersökta parametrarna kan bedömmas genom reaktorernas stabilitet under provtagningsperioden. Vissa parametrar är självklart viktigare för vissa bedömningar. Till exempel så är driftsparametrarna temperatur och exponeringstid fastställt viktigare för reduktion av patogener (Olsen & Larsen, 1987; Sahlström, 2003; Watanabe et al., 1997). Men även mikrobiell konkurrens och metabolism kan antas spela stor roll för reduktionen av läkemedelsrester och mikroföroreningar varvid det blir viktigt att fastställa att reaktorerna var stabila under utvärderingsperioden då det i så fall kan antas att de mikrobiella populationerna i reaktorerna även de var stabila.

I tabell 6-1 presenteras driftsdata för provtagningsperioden (försöksdag 102–135). Det framgår av tabellen att samtliga reaktorer var stabila i avseende på gasproduktion, metanhalt, total alkalinitet samt koncentrationer av ammoniumkväve och fettsyror acetat och propionat under provtagningsperioden. Koncentrationen av fettsyror var dock högre i de reaktorer som drevs vid 60 °C. Vidare var metanproduktionen för dessa reaktorer 9–11 % lägre än för reaktorerna som drevs vid 55 °C. Metanproduktionen för dessa var i sin tur lika hög som metanproduktionen vid mesofil rötning. Det framgår också av tabellen att utrötningsgraden var något högre i de reaktorer som drevs vid 15 dygns hydraulisk uppehållstid. Avslutningsvis var koncentrationen av vätesulfid i biogasen något högre i en av reaktorerna som drevs vid 60 °C än för övriga reaktorer. Koncentrationen var dock långt under problematiska nivåer. Sammanfattningsvis visar driftsdata att samtliga provsvar är representativa för drift vid de undersökta parametrarna.

Tabell 6-1 Medelvärden för processparametrar under provtagningsperioden (försöksdag 102–135). Inom parentes anges standardavvikelse respektive min och max värde i fallet för pH.

| | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur (°C) | 55.0 (0.8) | 55.0 (0.4) | 60.0 (0.6) | 59.9 (0.4) | 34.8 (0.3) |
| Hydraulisk retentionstid (dygn) | 15 | 7 | 7 | 15 | 15 |
| Gasproduktion (l/dygn) | 19 (2) | 38 (5) | 37 (5) | 17 (2) | 19 (2) |
| Metaninnehåll (volym-%) | 65 (1) | 67 (1) | 62 (1) | 63 (1) | 66 (1) |
| Metanproduktion (NI/kg VSin) | 311 (14) | 301 (17) | 275 (23) | 278 (17) | 312 (20) |
| Utrötningsgrad (% VS) | 62 (5) | 51 (4) | 49 (4) | 54 (4) | 56 (5) |
| pH | 7.4 (7.3–7.5) | 7.4 (7.3–7.5) | 7.4 (7.3–7.4) | 7.4 (7.4–7.5) | 7.3 (7.2–7.3) |
| NH ₄ -N (mg/l) | 1 024 (62) | 1 014 (53) | 928 (64) | 962 (38) | 965 (40) |
| Total Alkalinitet (mg CaCO ₃ /l) | 5 768 (592) | 6 088 (495) | 5 717 (338) | 5 822 (457) | 5 650 (358) |
| Acetat (mg/l) | 71 (37) | 32 (12) | 281 (207) | 166 (69) | 13 (5) |
| Propionat (mg/l) | 16 (21) | 2 (3) | 113 (170) | 43 (59) | 3 (11) |
| Vätesulfid (ppm H ₂ S) | 20 (18) | 2 (1) | 6 (4) | 127 (54) | 0 (1) |

6.2 Processtabilitet och metanproduktion vid 60 °C

Båda reaktorerna som drevs vid 60 °C var stabila under både försöksperioden kontinuerlig drift samt provtagningsperiod vilket framgår av tabell 6-1. Det enda som kan tolkas som att det skulle vara svårare att röta blandslam vid 60 °C är att halterna av fettsyror och vätesulfid är högre än för övriga reaktorer. Dock var dessa halter aldrig i närheten av rapporterade inhiberingsnivåer och det kan fastslås att rötning av blandslam vid 60 °C går att driva stabilt (Chen et al., 2003; Gallert & Winter, 1997; Gerardi, 2003; Henze et al., 2002; Jarvis & Schnürer 2009; Khanal, 2008; Mata-Alvarez, 2003; Tchobanoglous et al., 2003).

Det framgår av tabell 6-1 att metanproduktionen vid 60 °C var 9–11 % lägre än för rötning vid 55 °C vilket är en följd av att både metanhalten och utröttningsgraden är något lägre vid den högre temperaturen. En tänkbar förklaring till detta kan vara förändringar i den mikrobiella populationen mellan de båda temperaturerna. Scherer (2003) visade i rötförsök att den mikrobiella populationen var drastiskt annorlunda vid 60 °C än vid 55 °C vilket stöds av Van Lier et al. (1993) samt Zinder (1990) som båda har visat att det är en stor skillnad på vilka genus av metanogener som har optima vid olika termofila temperaturer. De två grupperna av störst intresse är genus *Methanosarcina* respektive *Methanosaeta* som skiljer sig åt i flertalet avseenden (Zinder, 1990). Det mer snabbväxande genuset *Methanosarcina* växer som kocker och har ett temperaturoptimum kring 50–55 °C med mycket lägre tillväxthastighet vid 60 °C (Zinder, 1990). Vid temperaturer mellan 60–65 °C har istället genuset *Methanosaeta* sitt tillväxtoptimum (Van Lier, 1993). Dessa stavformade metanogener har endast visats kunna använda acetat som substrat för metanproduktion och har en betydligt lägre tillväxthastighet (Zinder, 1990). Vidare finns det skillnader mellan tillväxthastigheten vid låga substratkoncentrationer för de båda genusen vilket kan vara en tänkbar förklaring till den lägre metanproduktionen vid 60 °C. *Methanosaeta*-organismer har en konkurrensfördel vid lägre acetatkoncentrationer då *Methanosarcina* kräver en koncentration på minst 59–148 mg Acetat / l för att använda detta substrat för tillväxt (Zinder, 1990). Då koncentrationerna av acetat i de reaktorer som drevs vid 60 °C alltid låg över miniminivån för *Methanosarcina* kan det tänkas att detta genus dominerade i 60 °C reaktorerna trots den långsammare tillväxthastigheten vid denna temperatur (Zinder et al., 1984; Zinder, 1990). Ett sådant resonemang stöds även av Zinder et al. (1984) som nämner en kultur dominerad av *Methanosarcina* som en tänkbar förklaring till sämre process vid temperaturer vid eller över 60 °C i undersökta studier. En suboptimal tillväxtmiljö vid 60 °C skulle förklara de lägre metanhaltarna och utröttningsgraderna som syntes i reaktorerna som drevs vid denna temperatur. Något som motsäger detta resonemang är att Scherer (2003) i sitt försök undersökte den mikrobiella populationen och enbart fann stavformade metanogener i reaktorerna vid 60 °C medan reaktorer vid lägre temperaturer innehöll en blandning av dessa och kocker. Även om ingen genusbestämning gjordes i Scherers försök är det troligt att de stavformade metanogenerna var av genuset *Methanosaeta*. Oavsett visar avsaknaden av kocker vid 60 °C att inga *Methanosarcina* levde vid denna temperatur. Zinder (1990) har dock efter att ha gått igenom litteraturen

på området satt den övre temperaturgränsen för *Methanosarcina* till 62 °C vilket kan betyda att det kan ha levt *Methanosarcina* i reaktorerna som drevs vid 60 °C. Utan mikrobiell analys av rötslammet gick det dock inte att fastställa förhållanden mellan de båda genusen i reaktorerna.

Förekomsten av vätesulfid i båda röt-kamrarna som drevs vid 60 °C bevisar att sulfatreducerande bakterier kan förekomma vid anaerob rötning vid 60 °C vilket har hävdats vara omöjligt (Ahammad et al., 2008; Zehnder et al., 1988). Då koncentrationerna var högre i båda reaktorerna vid 60 °C än i motsvarande reaktorer som drevs vid 55 °C kan slutsatsen dras att konkurrensen mellan metanogener och sulfatreducerande bakterier är mer ofördelaktig för metanogener vid den högre temperaturen under de processförhållanden som undersöktes.

6.3 Hygieniseringseffekt av rötning och pastörisering

Nedan presenteras analysvar för de mikroorganismer som nämnts som tänkbara indikatororganismer i arbetsdokument och förordningsförslag (EC, 2001; EC, 2010; Naturvårdsverket, 2010). Notera att för samtliga mikroorganismer utom *Salmonella* så anges svaren som colony-forming unit (CFU) per gram våtvikt eller per gram TS (torrsubstanshalt) efter vad som bäst motsvarar föreslagna gränsvärden. Provsvar för samtliga organismer tillsammans med utlåtande från SVA återfinns i Appendix B.

Resultat för *Salmonella* återges i tabell 6-2 och anges kvalitativt som positivt eller negativt för närvaro i 25 g våtvikt av prov. Det framgår att *Salmonella* påträffats i alla obehandlade slampartier likväl efter mesofil rötning. Däremot påträffades *Salmonella* aldrig i pastöriserat slam eller efter termofil rötning vid 55 °C respektive 60 °C oavsett exponeringstid.

Tabell 6-2 Kvalitativ analys (Ja eller Nej för förekomst) av *Salmonella* i prover om 25 g våtvikt. Förkortningen n.d. innebär att ingen analys gjordes.

| Obehandlat blandslam | 70 °C, 60 min | Exponerings- tid (h) | 35°C, 15 dygns HRT | 55°C, 7 dygns HRT | 55°C, 15 dygns HRT | 60°C, 7 dygns HRT | 60°C, 15 dygns HRT |
|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Ja | n.d. | 24 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | n.d. | 24 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | Nej | 6 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | Nej | 6 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | Nej | 2,5 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | Nej | 2,5 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | Nej | 2 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |
| Ja | Nej | 2 | Ja | Nej | Nej | Nej | Nej |

För att överensstämja med föreslagna gränsvärden återges resultat för presumtiva *E.coli* både i enheter av CFU / g våtvikt i tabell 6-3 respektive i CFU / g TS i tabell 6-4. Sett till reduktionen av *E.coli* per gram våtvikt framgår det att alla mätvärden från både mesofil rötning samt alla termofila uppställningar och för pastöriseringen är lägre än det föreslagna gränsvärdet på $5 \cdot 10^5$ CFU / g våtvikt (EC, 2010). Vid ett tillfälle är även koncentrationen

i obehandlat slam lägre än det föreslagna gränsvärdet. Det är vidare noterbart att *E.coli* vid två tillfällen detekteras i prover från rötning vid 55 °C. Vid det ena tillfället ligger koncentrationen precis på detektionsgränsen vilket enligt SVA som utförde analysen kan förekomma vid enstaka tillfällen eftersom analys sker genom att odla överlevande organismer. Enstaka prover kan därmed inkludera överlevande organismer vilket ger resultat på detektionsgränsen som dock bör vara få i förhållande till den totala mängden prov. I det andra fallet är koncentrationen över detektionsgränsen och beror troligtvis på återkontaminering eftersom detta prov även visades positivt för totala koliforma bakterier (resultat återges i Appendix B). Hygieniserings-effekten för termofil rötning vid samtliga temperaturer bör dock ses som god då behandling vid kortare exponeringstider av betydligt högre koncentrationer i det obehandlade slammet ger resultat under detektionsgränsen.

Tabell 6-3 Halter av presumtiva *E.coli* per gram våtvikt angivna med 2 värdesiffrors noggrannhet. Kursiva resultat var under detektionsgränsen på 10 CFU / g våtvikt. Förkortningen n.a. innebär att ingen mätning gjordes.

| Obehandlat blandslam | 70 °C, 60 min | Exponerings- tid (h) | 35 °C, 15 dygns HRT | 55 °C, 7 dygns HRT | 55 °C, 15 dygns HRT | 60 °C, 7 dygns HRT | 60 °C, 15 dygns HRT |
|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 910 000 | n.a. | 24 | 3 700 | < 10 | 10 | < 10 | < 10 |
| 2 000 000 | n.a. | 24 | 4 200 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |
| 1 400 000 | < 10 | 6 | 3 700 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |
| 630 000 | < 10 | 6 | 8 500 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |
| 630 000 | < 10 | 2.5 | 14 000 | 70 | < 10 | < 10 | < 10 |
| 3 000 000 | < 10 | 2.5 | 10 000 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |
| 280 000 | < 10 | 2 | 5 700 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |
| 1 400 000 | < 10 | 2 | 12 000 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |

Sett till resultaten för *E.coli* i enheter av CFU / g TS vilket är enheten som används i Naturvårdsverkets förordningsförslag på < 1 000 / g TS framgår tydligt av tabell 6-4 att mesofil behandling inte klarar av detta gränsvärde trots en reduktion på minst 98 % gentemot koncentrationen i obehandlat slam. Däremot visar alla mätvärden för termofil rötning, med undantag av ett, det troligtvis kontaminerade provet, resultat under det föreslagna gränsvärdet.

Tabell 6-4 Halter av presumtiva *E.coli* per gram TS angivna med 2 värdesiffrors noggrannhet. Kursiva resultat var under detektionsgränsen på 10 CFU / g våtvikt. Förkortningen n.a. innebär att ingen mätning gjordes.

| Obehandlat blandslam | 70 °C, 60 min | Exponerings- tid (h) | 35 °C, 15 dygns HRT | 55 °C, 7 dygns HRT | 55 °C, 15 dygns HRT | 60 °C, 7 dygns HRT | 60 °C, 15 dygns HRT |
|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 24 000 000 | n.a. | 24 | 167 000 | 430 | 740 | 420 | 460 |
| 49 000 000 | n.a. | 24 | 184 000 | 410 | 540 | 410 | 440 |
| 34 000 000 | 240 | 6 | 163 000 | 400 | 430 | 400 | 440 |
| 16 000 000 | 250 | 6 | 392 000 | 430 | 580 | 420 | 450 |
| 16 000 000 | 250 | 2,5 | 645 000 | 2 800 | 580 | 420 | 450 |
| 61 000 000 | 200 | 2,5 | 490 000 | 430 | 480 | 400 | 440 |
| 7 000 000 | 250 | 2 | 263 000 | 430 | 580 | 420 | 450 |
| 28 000 000 | 200 | 2 | 588 000 | 430 | 480 | 400 | 440 |

Resultaten för enterokocker återges i CFU / g TS i tabell 6-5 nedan. Det framkommer av tabellen att alla provtagningar från mesofil rötning, med undantag av en, var över detektionsgränsen och över det föreslagna gräns-

värdet på < 1 000 / g TS. I ett prov var koncentrationen till och med högre än i obehandlat blandslam, vilket stödjer data om att denna organism inte reduceras nämnvärt vid mesofil temperatur (Haghighatafshar, 2011). Resultaten för mesofil rötning står dock i viss motsats till de resultat som erhöles i en undersökning av rötning i fullskala vid svenska reningsverk som gjordes av Sahlström et al. (2004) som visade en genomsnittlig nedbrytning av enterokocker på 94 % vid mesofil rötning.

Tabell 6-5 Halter av enterokocker per gram TS angivna med 2 värdesiffrors noggrannhet. Kursiva resultat var under detektionsgränsen (100 CFU / g våtvikt). Förkortningen n.a. innebär att ingen analys gjordes.

| Obehandlat blandslam | 70 °C, 60 min | Exponerings-tid (h) | 35 °C, 15 dygns HRT | 55 °C, 7 dygns HRT | 55 °C, 15 dygns HRT | 60 °C, 7 dygns HRT | 60 °C, 15 dygns HRT |
|----------------------|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 81 000 | n.a. | 24 | 4 500 | 4 300 | 7 400 | 4 200 | 4 600 |
| 710 000 | n.a. | 24 | 92 000 | 4 100 | 5 400 | 4 100 | 4 400 |
| 75 000 | 2 400 | 6 | 67 000 | 4 000 | 4 300 | 4 000 | 4 400 |
| 42 000 | 2 500 | 6 | 29 000 | 4 300 | 5 800 | 4 200 | 4 500 |
| 670 000 | 2 500 | 2,5 | 230 000 | 4 300 | 5 800 | 4 200 | 4 500 |
| 36 000 | 2 000 | 2,5 | 83 000 | 4 300 | 4 800 | 4 000 | 4 400 |
| 45 000 | 2 500 | 2 | 29 000 | 4 300 | 5 800 | 4 200 | 4 500 |
| 24 000 | 2 000 | 2 | 98 000 | 4 300 | 4 800 | 4 000 | 4 400 |

För prov från termofil rötning återges tre prov precis på detektionsgränsen vilket innebär att en koloni har återträffats vid analys genom odling av mikroorganismer. Närvaro av mikroorganismer tyder på att dessa prov inte är hygieniserade i tillräcklig utsträckning. Detta överensstämmer inte väl med beräkningar baserade på rapporterade decimeringstider som visar att antalet enterokocker decimeras med 90 % per 12 minuter vid 60 °C respektive per 32 minuter vid 55 °C (Haghighatafshar, 2011). Enligt dessa beräkningar bör inte 100 CFU/g våtvikt enterokocker ha funnits kvar efter de exponeringstider vid 60 °C som renderat resultat på detektionsgränsen ovan. Resultat på detektionsgränsen vid 55 °C och 2 h exponeringstid kan enligt beräkningar återfås vid en provvolym på 300 ml vilket är mer än vad som användes vid mikrobiell analys. Att enterokocker ändå återfunnits kan ha tre orsaker. För det första kan närvarande enterokocker ha mycket högre decimeringstid än de som beräknats av Haghighatafshar (2011) från tidigare data (totalt 20 resultat på decimeringstider från 3 olika studier). Detta är inte troligt då de decimeringstider som krävs för att nå 100 CFU / g våtvikt är mindre än en sjundedel av de som anges av Haghighatafshar (2011). För det andra så kan närvaron bero på återkontaminering av prover. Detta är fullt möjligt men att alla tre prover i så fall skall ge resultat på detektionsgränsen, till skillnad från det prov sannolikt var kontaminerat med koliforma bakterier där koncentrationer sex gånger över detektionsgränsen erhöles, får anses vara osannolikt. För det tredje så kan närvaron av just en koloni i provvolymen berott på slump då fler överlevande mikroorganismer kan hamnat i provvolymen än vad som borde ske vid perfekt omblandning. Detta kan förklara det positiva provsvaret vid 55 °C men baserat på beräkningar bör inga enterokocker ha återfunnits i 20 l reaktorvolym vid de exponeringstider som genererat provsvar på detektionsgränsen för 60 °C. Något som dock stödjer antagande om det senare är att inga provsvar över detek-

tionsgränsen erhållits för prover där flera av följande har varit sant: Högre koncentration i obehandlat slam, kortare HRT, kortare exponeringstid eller lägre temperatur. Detta pekar på god hygienisering vid termofil rötning för testade exponeringstider överlag. Dock bör detta styrkas med fler provsvar.

Vidare uppstår ett problem då detektionsgränsen för enterokocker är 100 CFU / g våtvikt varför det inte kan bevisas att något resultat (inte ens de under detektionsgränsen) från termofil rötning är under det föreslagna gränsvärdet på 1 000 CFU / g TS när resultaten räknas om från CFU / g våtvikt till CFU / g TS eftersom TS-halten i rötresten endast var 1,4–2,5 %. Dock så motsvarar TS-koncentrationerna på rötat slam vad som kan förväntas och den TS-halt på minst 10 % som behövs för att kunna bevisa att gränsvärdet uppfylls kräver att slammet förtjockas. Görs detta så frångås dock analysmetoden för enterokocker vilket gör att resultaten inte kan valideras. Här finns alltså ett omedelbart behov av att validera en anpassad metod ifall gränsvärdet i naturvårdsverkets förordningsförslag skall implementeras.

En extra provomgång då prover för enterokocker centrifugerades till en TS-koncentration på 12–20 % innan analys utfördes i denna studie och resultaten återges i tabell 6-6. Här kan ses att alla provsvar för termofil rötning hamnar under detektionsnivån och gränsvärdet vilket tyder på att termofil behandling vid både 55 och 60 °C hygieniserar slammet väl ned till exponeringstider på 2 h. Dock så skulle det behöva göras ytterligare undersökningar för att validera detta och faktum kvarstår att det inte kan fastställas att behandlingen lever upp till gränsvärdet för enterokocker med nuvarande analysmetod. Vidare kunde alla pastöriserade prover visas ligga under gränsvärdet samtidigt som inga prover från mesofil rötning gjorde det utan istället låg nära koncentrationerna i obehandlat blandslam.

Tabell 6-6 Halter av enterokocker per gram TS i centrifugerade prover angivna med 2 värdesiffrors noggrannhet. Detektionsgränsen var 100 CFU / g våtvikt och kursiva resultat var under detektionsgränsen. Förordningsförslaget anger ett gränsvärde på < 1 000 / g TS.

| Obehandlat blandslam | 70 °C, 60 min | Exponerings-tid (h) | 35 °C, 15 dygns HRT | 55 °C, 7 dygns HRT | 55 °C, 15 dygns HRT | 60 °C, 7 dygns HRT | 60 °C, 15 dygns HRT |
|----------------------|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 150 000 | 650 | 24 | 120 000 | 840 | 680 | 810 | 650 |
| 75 000 | 530 | 2 | 61 000 | 640 | 680 | 740 | 500 |

Halterna för *Clostridium perfringens*, nedan i tabell 6-7, skiljer sig drastiskt från övriga analyserade mikroorganismer då provsvaren härifrån är mycket ojämna och i vissa fall högre i behandlat slam än i det obehandlade. Vidare kunde *Clostridium perfringens* vid en provomgång inte påvisas i det obehandlade provet medan det återfanns i höga koncentrationer i behandlat slam. Om denna provomgång bortses från så framgår det att termofil behandling i 31 av 32 provsvar reducerar patogenen. Vidare kan man se en trend att *Clostridium perfringens* reduceras mer vid 60 °C än vid 55 °C samt vid 15 dygns HRT än vid 7 dygns HRT men då den procentuella reduktionen för respektive uppställning fluktuerar går detta inte att säkerställa. Provsvaren för mesofil rötning ger ingen indikation på att behandlingen skulle reducera antalet clostridier. I hälften av fallen reduceras antalet i förhållande till orötat blandslam medan de är högre i resterande prov. Vid pastörisering var provsvaren i fyra fall av sex lägre i det pastöriserade slammet än i obehandlat

slam. I de fall reduktion förekom så var den i storleksordning liknande den reduktion som visats i andra studier (Bagge et al., 2005; Sahlström, 2008). Vid pastöriseringsförsök under samma temperatur och tid som i detta visade Sahlström (2008) en genomsnittlig reduktion på 60 % av *Clostridium perfringens*. Vidare visade Bagge et al. (2005) att *Clostridium perfringens* inte reducerades betydligt i fyra svenska reningsverk som hade pastöriseringssteg innan rötammaren. Sammanfattningsvis kan sägas att termofil rötning ger en otillräcklig reduktion av *Clostridium perfringens* och att resultat för denna organism skiljer sig drastiskt från övriga undersökta.

Tabell 6-7 Halter av *Clostridium perfringens* per gram våtvikt angivna med 2 värdesiffrors noggrannhet. Detektionsgränsen var 10 CFU / g våtvikt. Kursiva resultat var under detektionsgränsen. Förkortningen n.a. innebär att ingen analys gjordes.

| Obehandlat blandslam | 70 °C, 60 min | Exponerings- tid (h) | 35 °C, 15 dygns HRT | 55 °C, 7 dygns HRT | 55 °C, 15 dygns HRT | 60 °C, 7 dygns HRT | 60 °C, 15 dygns HRT |
|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 4 000 | n.a. | 24 | 26 000 | < 10 | < 10 | 2 000 | < 10 |
| 62 000 | n.a. | 24 | 54 000 | 70 000 | 31 000 | 13 000 | 9 700 |
| 130 000 | 55 000 | 6 | 79 000 | 67 000 | 49 000 | 35 000 | 27 000 |
| 130 000 | 48 000 | 6 | 45 000 | 69 000 | 29 000 | 29 000 | 5 100 |
| 95 000 | 42 000 | 2,5 | 150 000 | 50 000 | 16 000 | 59 000 | 23 000 |
| 65 000 | 75 000 | 2,5 | 95 000 | 34 000 | 30 000 | 32 000 | 8 500 |
| < 10 | 35 000 | 2 | 31 000 | 53 000 | 35 000 | 42 000 | 18 000 |
| 89 000 | 77 000 | 2 | 74 000 | 39 000 | 14 000 | 37 000 | 19 000 |

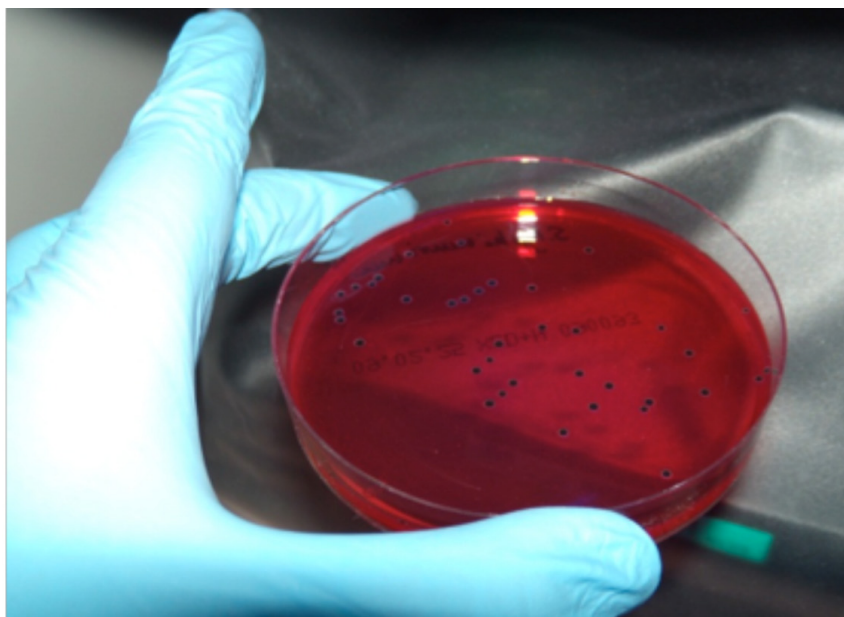
I en sammanfattande diskussion kring den hygieniserande effekten av rötning tjänar resultaten från mesofil prover som intressant jämförelse mot resultaten från den termofila rötningen respektive pastörisering. Den enda patogen som kunde visas reduceras i hög utsträckning vid mesofil rötning i denna studie var *E.coli* som reducerades med 98 % och därmed låg långt under det gränsvärde som anges i arbetsdokumentet kring EU:s slamdirektiv (EC, 2010). Koncentrationen av enterokocker både ökade och minskade genom mesofil rötning varför ingen reduktion kunde visas. Variationerna i koncentration beror troligtvis på skiftande koncentrationer i de slampartier som matats in innan provtagning. Samtliga provsvar för *Salmonella* var positiva vilket stödjer den slutsats som Sahlström et al. (2004) drar med stöd av ytterligare litteratur och menar att *Salmonella* generellt behöver veckor eller upp till månader för att inaktiveras vid mesofil rötning. Då Sahlström undersökte reningsverk i fullskala detekterades visserligen *Salmonella* endast i 58 % av proven från mesofil rötning men Sahlström nämner även att halten positiva svar kan öka ju högre antal personekvivalenter som avloppsreningsverket behandlar. Resultaten erhållna i detta försök stödjer ett sådant resonemang då *Salmonella* här detekterades i 100 % av proven från mesofilt rötat blandslam från Sjölundaverket som behandlar strax under 300 000 personekvivalenter, vilket är betydligt mer än för de reningsverk som Sahlström undersökte (Sahlström et al., 2004). Resultaten för analys av *Salmonella*, *E.coli* och enterokocker från mesofil rötning visar att denna behandling inte klarar av de föreslagna gränsvärdena i Naturvårdsverkets förordningsförslag eller arbetsdokumentet kring revidering av EU:s slamdirektiv (EC, 2010; Naturvårdsverket, 2010).

Provsvar från termofil rötning vid 55 och 60 °C visar generellt att rötning vid dessa temperaturer ger en kraftig reduktion av Salmonella, enterokocker och *E.coli*. Salmonella återfanns inte i ett enda av de 32 proverna som gjordes på termofilt rötat slam. Detta står i viss kontrast till Sahlströms studie som vid ett prov av åtta från ett termofilt reningsverk återfann Salmonella men överensstämmer med den generella uppfattningen att Salmonella är mycket känslig för termofil behandling som delas i många rapporter (Olsen & Larsen, 1987; Sahlström, 2003; Sahlström et al., 2004; Watanabe, 1997). För enterokocker återfanns tre svar på detektionsgränsen vilket kan förklaras med analysmetoden, dock är samtliga vid de kortare exponeringstiderna 2,5 h och 2 h och för rötning vid 55 °C eller rötning med 7 dygns HRT vid 60 °C vilket kan tyda på att risken för att få provsvar över detektionsgränsen ökar vid dessa driftinställningar, det vill säga att hygieniseringen är sämre än vid exponeringstiderna 6 och 24 h, och fler analyser behövs för att bekräfta att de kortare exponeringstiderna 2,5 och 2 h ger fullgod hygienisering för dessa kombinationer av temperatur och HRT. Rötning vid 60 °C med 15 dygn HRT gav dock aldrig provsvar över detektionsgränsen för Salmonella, enterokocker eller *E.coli* och det är således mycket troligt att denna kombination av temperatur och hydraulisk retentionstid ger fullgod hygienisering vid exponeringstider ned till 2 h. Sammanfattningsvis konstaterades att termofil rötning vid både 55 och 60 °C ger en mycket bättre hygienisering av blandslam jämfört med mesofil rötning med avseende på Salmonella, enterokocker och *E.coli*. Det kan dock inte bevisas att någon av de föreslagna kombinationerna av temperatur och exponeringstid klarar av det gränsvärde för enterokocker som nämns i naturvårdsverkets förordningsförslag på grund av att slamprover behöver centrifugeras för att visas ligga under det föreslagna gränsvärdet på 1 000 CFU / g TS. Vidare gav pastörisering vid 70 °C under 60 minuter mycket goda resultat. Inget provsvar för *E.coli* eller enterokocker var över detektionsgränsen och inte heller Salmonella påträffades i något prov. Dessa resultat stödjer tidigare undersökningar där pastörisering vid samma temperatur och tid har visats ha en god hygieniserande effekt (Bagge 2005; Sahlström 2008). Dock kan inte heller proverna från pastöriseringen visas ligga under gränsvärdet för enterokocker som anges i naturvårdsverkets förordningsförslag om analysmetoden följs. Vid centrifugering av proverna så ligger dock halterna under gränsvärdet. Pastörisering vid 70 °C under 1 h får därmed anses klara av gränsvärdena som anges av naturvårdsverket (Naturvårdsverket, 2010) för Salmonella och *E.coli* men kan inte visas klara av gränsvärdet för enterokocker med nuvarande metod. Slutsatserna från resultaten i denna studie återges i tabell 6-8 och i figur 6-1 visas ett foto från analys av Salmonella.

Tabell 6-8 Erfordrade exponeringstider för att uppnå de föreslagna gränsvärdena i arbetsdokumentet kring revidering av EU:s slamdirektiv (EC, 2012) respektive Naturvårdsverkets förordningsförslag (Naturvårdsverket, 2010).

| Temperatur | 35 °C | 55 °C | 55 °C | 60 °C | 60 °C | 70 °C |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|
| HRT | 15 dygn | 7 dygn | 15 dygn | 7 dygn | 15 dygn | - |
| EU | X | 2 h | 2 h | 2 h | 2 h | 60 min |
| Naturvårdsverket | X | 2 h* | 2 h* | 2 h* | 2 h* | 60 min* |

* Fullgod hygienisering i avseende på gränsvärdet för enterokocker kunde ej fastställas.



Figur 6-1 Inkuberade prover för Salmonella. Foto: Josefine Elving, SVA.

6.4 Förekomst och reduktion av läkemedelsrester

Totalt analyserades 99 läkemedelssubstanser i prover (dubbletter eller triplikat) från obehandlat blandslam, rötslam från olika temperaturer och exponeringstider samt pastöriserat slam. Av dessa kunde 72 stycken påvisas i minst ett provsvar och 19 av läkemedlen kunde alltid påvisas i både obehandlat blandslam, rötat slam och pastöriserat slam. Påvisade substanser återfanns i koncentrationer mellan ng/g TS till µg/gTS och visade generellt upp en mycket hög spridning. Tester över återfinnandegrad av spikade prover, så kallade recoverytester, som utförts på avloppsvatten och avloppsslam visar generellt på lägre återfinnandegrader och högre standardavvikelser för slamprover (Fick, 2012). Detta kan bero på att vissa läkemedelssubstanser binder hårt till laddade partiklar i slammet och därmed blir svåra att extrahera vid analys och att slam har en hög koncentration av många organiska ämnen med olika molekyelstorlek vilket stör analysen, så kallade matriseffekter. (Fick, 2012; Hörsing et al., 2011). Svårigheten att analysera för läkemedel i slam förklarar alltså de höga standardavvikelserna i erhållna resultat och bättre metoder för dessa analysmetoder bör utarbetas.

Erhållna koncentrationer för utvalda substanser vid 24 respektive 2 h exponeringstid presenteras i tabell 6-9 och 6-10. Bland substanserna ses de tre läkemedelssubstanser (Diclofenac, Estradiol och Etinylestradiol) som omnämns i förslaget till ändring av ramdirektivet för vatten inom EU (EC, 2012). Resterande substanser i tabellen är utvalda på grund av att de avviker kraftigt från värden rapporterade i andra rapporter (Bupropion, Ciprofloxacin och Miconazole), för att de hade de högsta registrerade koncentrationerna i denna studie (Ciprofloxacin, Dipyrindamol, Sertraline, Irbesartan och Ketoconazole) eller för att de visar tecken på att reduceras vid rötning (Irbesartan och Trimetoprim). Observera att TS-halten var ungefär dubbelt så hög i obehandlat blandslam och pastöriserat slam som i det rötade slammen varför tecken på reduktion förstärks då resultaten räknas om till ng /g våtvikt. Resultat för övriga läkemedelssubstanser återfinns i Appendix C.

Tabell 6-9 Medelvärden för utvalda läkemedelssubstanser vid 24 h minsta exponeringstid i ng/g TS angivna med max 2 värdesiffrors noggrannhet. Antal prover (n) är n=2 för samtliga slamprover utom för 70 °C då n=3. Standardavvikelse anges till höger om respektive koncentration. Förkortningen n.a. innebär att läkemedlet ej analyserades för.

| Substans | Obehandlat blandslam (4,1 % TS) | 35 °C, 15 dygns HRT (2,1 % TS) | 55 °C, 15 dygns HRT (2,1 % TS) | 60 °C, 15 dygns HRT (2,2 % TS) | 70 °C, 60 min (4,3 % TS) |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Diclofenac | < 10 - | < 10 - | 10,0 - | < 10 - | < 10 - |
| Estradiol | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| Ethinylestradiol | < 10 - | < 10 - | < 10 - | <10 - | <10 - |
| Bupropion | 9 2 | 15 8 | 18 5 | 14 3 | 12 3 |
| Ciprofloxacin | 2 400 600 | 5 100 1 000 | 6 000 3 500 | 1 800 800 | 2 800 1 900 |
| Miconazole | 23 4 | 17 3 | 40 21 | < 5,0 - | 15 2 |
| Ciprofloxacin | 2 400 600 | 5 100 1 000 | 6 000 3 500 | 1 800 800 | 2 800 1 900 |
| Dipyridamol | 200 40 | 320 110 | 610 47 | 510 350 | 180 70 |
| Sertraline | 500 120 | 620 170 | 800 75 | 120 5 | 330 250 |
| Irbesartan | 300 200 | 160 200 | 100 14 | 5 - | 160 40 |
| Ketoconazole | 360 100 | 330 140 | 550 160 | 300 - | 80 - |
| Irbesartan | 300 200 | 160 200 | 100 14 | 5 - | 160 40 |
| Trimetoprim | 10 1 | 0,3 - | 4 6 | 1 - | 12 7 |

Tabell 6-10 Medelvärden (n=2 för samtliga slamprover utom för 70 °C då n=3) för utvalda läkemedelssubstanser vid 2 h minsta exponeringstid i ng/g TS angivna med max 2 värdesiffrors noggrannhet. Antal prover (n) är n=2 för samtliga slamprover utom för 70 °C då n=3. Standardavvikelse anges till höger om respektive koncentration. Förkortningen n.a. innebär att läkemedlet ej analyserades för.

| Substans | Obehandlat blandslam (4,9 % TS) | 35 °C, 15 dygns HRT (2,0 % TS) | 55 °C, 15 dygns HRT (2,1 % TS) | 60 °C, 15 dygns HRT (2,3 % TS) | 70 °C, 60 min (4,9 % TS) |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Diclofenac | < 10 - | < 10 - | < 10 - | < 10 - | < 10 - |
| Estradiol | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| Ethinylestradiol | < 10 - | < 10 - | < 10 - | < 10 - | < 10 - |
| Bupropion | 5 1 | 13 6 | 52 10 | 13 3 | 5 3 |
| Ciprofloxacin | 2 100 800 | 4 100 600 | 1 500 30 | 1 400 500 | 2 400 570 |
| Miconazole | 36 - | 19 13 | 50 30 | 10 - | 10 3 |
| Ciprofloxacin | 2 100 800 | 4 100 600 | 1 500 40 | 1 400 500 | 2 400 570 |
| Dipyridamol | 190 130 | 490 30 | 470 270 | 320 10 | 190 30 |
| Sertraline | 280 10 | 670 40 | 810 250 | 180 110 | 340 110 |
| Irbesartan | 1 900 2 600 | 540 380 | 20 20 | 60 10 | 240 100 |
| Ketoconazole | 200 60 | 160 50 | 220 90 | 90 0 | 110 - |
| Irbesartan | 1 900 2 600 | 540 380 | 20 20 | 60 10 | 240 100 |
| Trimetoprim | 19 21 | < 0,1 - | 1 0 | 5 0 | 30 20 |

Standardavvikelsen för prov i denna studie låg mellan 13–118 % med ett medelvärde för alla prov på nästan 50 %. Det var ingen skillnad på standardavvikelsen vid 24 h exponeringstid gentemot 2 h exponeringstid och ingen urskiljbar trend för standardavvikelse för orötat, pastöriserat eller vid olika temperaturer rötat slam. Kvalitén på provsvaren var inte annorlunda beroende på hur slammet behandlats. Den enda trend som kunde urskiljas i avseende på standardavvikelse var att dessa var lägre för de 19 substanser där resultat över kvantifieringsgränsen erhållits för samtliga undersökta prover (medel på ca 40 % standardavvikelse) respektive de ämnena med de högsta uppmätta koncentrationerna (medel på ca 35 % standardavvikelse).

Ett ytterligare problem är att vissa läkemedel tycks öka i koncentration över rötsteget. Högre uppmätta koncentrationer i behandlat slam än i obehandlat slam förekommer vid flertalet tillfällen för både pastöriserat samt mesofilt och termofilt rötat slam oavsett exponeringstid. Detta kan bero på osäkerheten i metoden som ger höga standardavvikelser eller på att mer läkemedel förekommer efter rötning. En beräkning visar att det förra är mer troligt då över 70 % av fallen då koncentrationer tycks öka hamnar inom osäkerheten som skapas av standardavvikelser på koncentration i obehandlat respektive behandlat slam. Vidare är proverna uttagna endast en till två dagar efter att nytt råslam hämtats och det är därmed inte omöjligt att koncentrationen i föregående sats råslam varit högre och därmed ökat koncentrationen i rötkammare. Något som talar för detta är resultaten från pastöriserade prover, vilka alltid gjordes på samma slampartier som obehandlat slam, som visar att ännu högre andel (80 - 90 %) av ökningarna faller inom spännvidden från standardavvikelsena. Det kan dock vara vanskligt att jämföra pastöriserat slam med rötat slam.

Två tänkbara orsaker kan annars förklara de högre uppmätta halterna i rötat slam. För det första skulle rötningen kunna öka extraktionsgraden av läkemedel ur slam både genom att reducera mängden partiklar som läkemedlen kan adsorbera till men även genom att ändra de kemiska förutsättningarna för adsorption till slammet. Dock har adsorption av läkemedel till aktiverat slam, som motsvarade 25 % av blandslammet i denna studie, visats påverkas väldigt lite av pH som tillsammans med reduktionspotentialen kan tänkas vara de kemiska parametrarna som ändras mest vid rötning (Hörsing et al., 2011). Den andra tänkbara orsaken är att koncentrationen av läkemedlet faktiskt ökar genom att nedbrytningsprodukter av läkemedel som utsöndrats i konjugerad form efter metabolisering i människokroppen kan ha återbildats till modersubstansen. Detta sistnämnda scenario är något som diskuterats för avloppsvatten i andra studier (Naturvårdsverket, 2008; Wahlberg et al., 2010).

Angående reduktion visar resultaten i denna studie att ytterst få av de analyserade läkemedlen uppvisar tecken på reduktion genom rötning, något som överensstämmer med samtida studier (Naturvårdsverket, 2008; Wahlberg et al., 2010). Inga generella trender för reduktion av läkemedelsrester går heller att läsa ut av resultaten. Tecken på reduktion vid rötning kan skönjas i enskilda fall men den höga standardavvikelsen gör att reduktion med en tiopotens ej går att fastställa för någon substans. Det bör även beaktas att tecken på reduktion kan bero på koncentration av substansen var lägre i den sats råslam som tidigare används som substrat då slammet byttes 2 dagar innan analys varför inte hela reaktormaterialet kommer från samma slam. Vidare finns det inte generellt tecken på att termofil rötning skulle reducera läkemedel bättre än mesofil rötning eller att 24 h exponeringstid skulle ge högre reduktion än 2 h exponeringstid. Prover från pastörisering visade lika ofta på en högre koncentration i behandlat slam som på en reduktion och reduktion med en tiopotens kunde inte fastställas för någon substans. Samantaget tyder detta på att rötning vid mesofil eller termofil temperatur eller enbart pastörisering inte är effektivt för att rena slammet från läkemedelsrester vilket även överensstämmer med andra studier som menar att aerob

behandling är effektivare för att reducera läkemedel än anaerob behandling (Naturvårdsverket, 2008; Wahlberg et al., 2010). Dock kvarstår det faktum att det är svårt att analysera läkemedel i avloppsslam varför bättre metoder bör framarbetas om några säkerställda slutsatser skall kunna dras.

En jämförelse mellan koncentrationer av läkemedelsrester i rötat slam från mesofil rötning i denna studie med rapporterade värden från mesofil rötning i fullskala presenteras i tabell 6-11 nedan. Data presenteras enbart för de substanser för vilka resultat återfanns i alla tre studier. Det framgår av tabellen att resultaten från denna studie i de flesta fall överensstämmer inom en tiopotens marginal med värden från övriga studier. Då standardavvikelsen är hög bör detta ses som rimlig avgränsning för jämförelse.

Tabell 6–11 Jämförelse av medelkoncentrationer i mesofilt rötat slam (n=2) vid exponeringstiderna 24 h respektive 2 h med rapporterade värden från mesofilt rötat slam i fullskaleanläggningar. Alla värden anges i enheter av ng / g TS. Medelvärden från resultat i denna studie återges med max 2 värdesiffrors noggrannhet.

| Substans | 24 h | 2 h | Stadskvarn ARV1 | Henriksdal ARV1 | Ön ARV1 | Kungsängs- verket ¹ | Henriksdal ARV ² | Bromma ARV ² |
|---------------|-------|-------|--------------------|--------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Atenolol | 21 | 34 | 13 | 19 | 12 | 19 | < 50 | < 50 |
| Ciprofloxacin | 5 100 | 4 100 | 450 | 250 | 170 | 68 | 3500 | 3730 |
| Citalopram | 220 | 180 | 760 | 570 | 630 | 460 | 750 | 500 |
| Desloratidin | 10 | 5 | 13 | 11 | 5,4 | 12 | 48 | 41 |
| Fluoxetin | 81 | 22 | 39 | 79 | 43 | 160 | 110 | 87 |
| Ketoconazole | 330 | 160 | 510 | 1200 | 1100 | 1800 | 1400 | 1700 |
| Metoprolol | 320 | 300 | 180 | 410 | 210 | 190 | 320 | 300 |
| Mianserin | 4 | 1 | 16 | 11 | 94 | 25 | 14 | 14 |
| Oxazepam | 33 | 43 | 43 | 18 | 12 | 18 | 23 | 17 |
| Risperidone | 3,1 | 1,0 | 1,2 | 2,1 | 1,9 | 0,75 | < 10 | < 5 |
| Sertraline | 620 | 670 | 440 | 380 | 420 | 770 | 610 | 530 |
| Tamoxifen | 13 | 7 | 6,7 | 13 | 7,5 | 9,6 | 21 | 31 |
| Zolpidem | 3 | 3 | 7,7 | 8,3 | 3,2 | 5,9 | 10 | 8 |

Rapporterade värden tagna från 1) Fick et al.(2011). 2) Wahlberg et al. (2010).

6.5 PAH och PCB

Resultat erhöles för 11 av de 15 PAH:er som slammet analyserades för. Övriga PAH:er låg under kvantifieringsgränsen. I tabell 6-12 presenteras summan av 7 PAH av de 8 som återfinns i förslaget till ändring av ramdirektivet för vatten, vilket alltså inte inkluderar benzo[k]flouranthene. Dock är koncentrationen för Dibenzo[a,h]anthracene medräknad då denna analyserades som grupp tillsammans med en annan PAH. Resultaten ges både i enheter av mg / kg TS respektive mg / kg våtvikt då TS-halten är ungefär hälften så hög i rötat slam som i orötat samt pastöriserat slam. Samtliga resultat för PAH återges i Appendix D tillsammans med resultat för PCB och gröningshämning. Resultaten för PCB hade hög avvikelse mellan duplikaten och ansågs därför inte tillförlitliga varför de ej publiceras här.

Det framgår av tabell 6-12 att ingen statistisk säkerställd reduktion av PAH kan urskiljas, något som också överensstämmer med resultat för resterande PAH:er. För enskilda föreningar (resultat återges i Appendix D) framgick reduktion vid rötning på upptill 60 % för benzo[g,h,i]perylene

Tabell 6–12 Summakoncentration av 7 PAH (naphthalene, fluoroanthene, anthracene, benzo[a]pyrene, benzo[b]fluoranthene, benzo[ghi]perylene, benzo[k]fluoranthene, indeno[1,2,3-cd]perylene) som återfinns i förslaget till ändring av ramdirektivet för vatten samt för dibenzo[a,h]anthracene. Resultaten återges både i mg/kg TS (överst) respektive µg/kg våtvikt (nederst).

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam | 70°C, 60 min | 35 °C, 7 dygns HRT | 55 °C, 15 dygns HRT | 60 °C, 15 dygns HRT | 55°C, 7 dygns HRT | 60°C, 7 dygns HRT |
|----------------------------|----------------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Enhet mg/kg TS | | | | | | | |
| 24 | 1,7 | 1,8 | 2,3 | 2,3 | 2,5 | 2,3 | 2,8 |
| 6 | 1,6 | 1,6 | 2,4 | 2,3 | 2,5 | 2,3 | 2,3 |
| 2,5 | 1,6 | 1,7 | 2,5 | 2,2 | 2,4 | 2,3 | 2,4 |
| 2 | 1,4 | 1,7 | 2,4 | 2,1 | 2,2 | 2,1 | 2,2 |
| Enhet µg/kg våtvikt | | | | | | | |
| 24 | 42 | 42 | 28 | 20 | 41 | 36 | 50 |
| 6 | 38 | 36 | 30 | 20 | 40 | 36 | 38 |
| 2,5 | 36 | 37 | 31 | 19 | 38 | 36 | 40 |
| 2 | 31 | 39 | 30 | 18 | 34 | 31 | 36 |

respektive indeno[1,2,3-cd]pyrene och dibenzo[a,h]anthracene (analyserades som grupp). Rötning vid 35 och 55 °C gav lika hög reduktion medan rötning vid 60 °C gav sämre reduktion. Vidare kunde inget tydligt samband mot exponeringstid urskiljas.

Den återfunna summakoncentrationen av PAH var hög i jämförelse med en samtida sammanställning över koncentrationen vid 7 svenska avloppsreningsverk (Olofsson, 2012). Dock visar resultaten inte på någon generell reduktion av undersökta PAH vid rötning vid 35, 55 eller 60 °C och inte heller vid pastörisering. För de 3 PAH:er som uppvisade reduktion när korrigering gjort för TS-halt överensstämmer detta till viss del med relevanta studier. Trably et al. (2003) visade att dessa 3 PAH reducerades i lika hög grad som övriga PAH, dock användes i denna studie betydligt längre hydraulisk uppehållstid (41 dygn i satsvisa försök) vilket kan ha medfört den utökade reduktionen av övriga PAH. I studien av Christensen et al. (2003) reducerades naphthalene i högst utsträckning, dock vid betydligt högre exponeringstid än de som undersöktes i denna studie. Att reduktionen ökar vid långa exponeringstider kan även bero på att reduktionen av PAH favoriseras först när övrigt lättnedbrytbart material konsumerats. Detta resonemang stöds till viss del av resultat i Trably et al. (2003) som visade att reduktionen ökar då biogasproduktionen går ned. Alternativt skulle den minskade produktionen kunna bero på inhibering av metanogener från den ökade vätgasproduktionen vid nedbrytning av PAH som Christensen et al. (2004) visat sker. Det sistnämnda får dock ses som osannolikt då bidrag till vätgaskoncentrationen från reduktion av PAH bör vara försumbar relativt övrig vätgasproduktion i biogasprocessen.

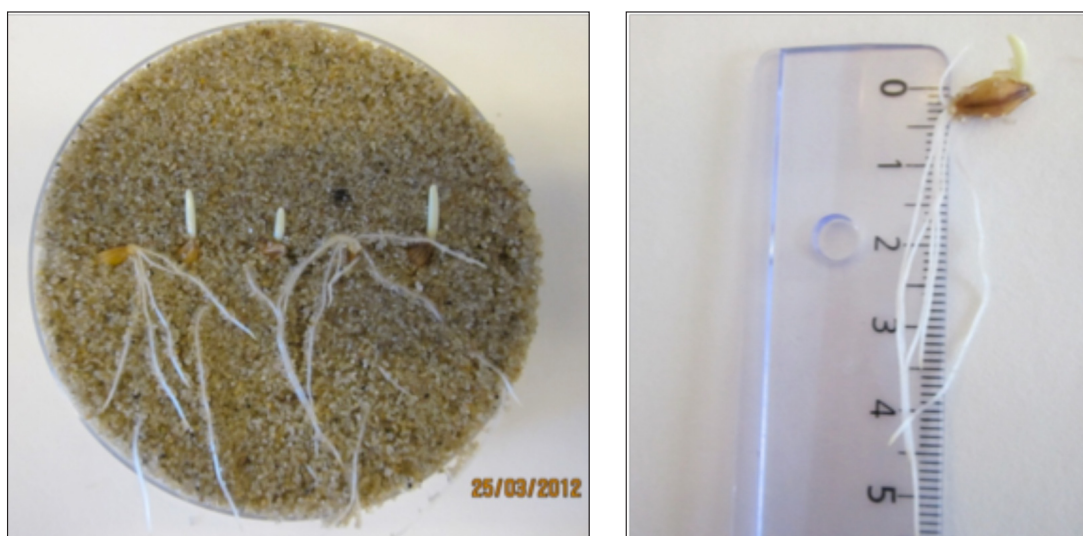
I avseende på temperaturberoende motsäger dock resultaten i denna studie både Trably et al. (2003) och Christensen et al. (2004). Resultaten för de 3 PAH som reducerades i denna studie visar att dessa reduceras sämre vid 60 °C än vid 55 °C men att rötning vid 35 °C gav liknande resultat som för 55 °C. Detta motsäger Trably et al. (2003) och Christensen et al. (2004) som menar att reduktionen ökar med temperaturen. Att resultaten var sämre för rötning vid 60 °C kan möjligtvis förklaras av att den mikrobiella kulturen har haft en annorlunda sammansättning vid denna temperatur i enlighet med resonemanget under ”Processtabilitet och metanproduktion

vid 60 °C". Detta skulle kunna vara en tänkbar förklaring då både Christensen et al. (2004) och Trably et al. (2003) menar att en anpassad mikrobiell kultur ger högre reduktion av PAH.

Sammanfattningsvis så visar resultaten på att PAH generellt inte reduceras nämnvärt vid anaerob rötning vare sig vid 35, 55 eller 60 °C såväl som vid pastörisering vid de undersökta exponeringstiderna även om resultaten indikerar att viss reduktion kan ske av enskilda PAH.

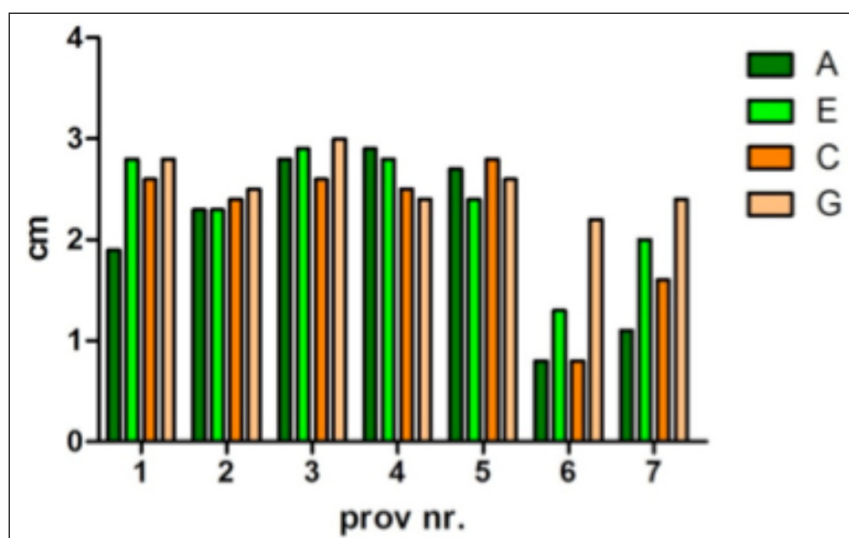
6.6 Groningshämning

Ugnstorkade och mortlade slamprover användes för test av groningshämning av kornfrön (*Hordeum vulgare*) genom att prover av rötat, pastöriserat respektive obehandlat blandslam blandades med sand och vatten i petriskålar varvid 5 frön tillsattes i varje skål. Som metod användes US EPA OPPTS 850.4200 och fullständig försöksbeskrivning återges i Appendix D. Groningen av rötterna mättes med en linjal efter 72 h, och jämfördes med groningen av kontroller (sand utan slamtillsättning). Groningshämningen beräknades som procenten av rötternas längd i slamblandningarna jämfört med längden hos rötterna i kontrollerna. Foto på ett odlingsförsök i petriskål samt mätning av rotlängd återges i figur 6-2.



Figur 6-2 Odlingsförsök av kornfrön i petriskål samt mätning av rotlängder.
Foto: M. Barrett Sørensen och C. Møller Kudahl vid Institut for Vand og Miljøteknologi vid DTU.

Resultaten visade att alla slamprover inhiberade kornväxten i jämförelse med sandreferensproverna. I figur 6-3 visas resultaten för slamprover och det framgår att obehandlat (prov nr. 6) samt pastöriserat slam (prov nr. 7) gav statistiskt kortare rotlängder än rötade slamprover (prov 1-5). Obehandlat slam gav i genomsnitt 62 % groningshämning jämfört med referens och pastöriserat slam gav i genomsnitt 46 %. För rötade slam kunde ingen skillnad fastställas för temperatur eller exponeringstiderna 6 h respektive 24 h. Kornfrö gror således inte bättre i det slam som behandlats med 24 h exponeringstid än det som behandlats med 6 h exponeringstid.



Provomgångarna motsvarar för rötade slamprover exponeringstiderna 24 h (A och C) respektive 6 h (E och G).

Figur med tillåtelse av Institut for Vand og Miljøteknologi vid DTU.

Figur 6-3 Genomsnittliga rotlängder uppmätta efter 72 h för rötade slamprover (1-5) respektive obehandlat blandslam (prov nr. 6) och slam pastöriserat vid 70 °C under 60 minuter (prov nr. 7).

6.7 Energifbalans

En energibalans för rötningen vid Sjölundaverket i Malmö har gjorts inom projektet för att utvärdera hur mycket energi som krävs för uppvärmning respektive hur mycket energi som produceras genom biogasproduktion vid olika hygieniseringsalternativ. Metanutbytena som erhöles vid pilotrötningen (35, 55 och 60 °C) av blandslam från Sjölanda applicerades på fullskaleförhållandena och jämfördes med den uppmätta gasproduktionen vid verklig fullskaledrift under år 2011, men även för en månad (juni 2012). Även pastöriseringsalternativet (70 °C under 60 minuter) applicerades i beräkningarna i ett scenario där slammet sedan rötades vid 35 °C. För detta fall gjordes två beräkningar. Ett där det antogs att pastöriseringen skulle kunna leda till upp till 20 % högre metanutbyte jämfört med mesofil rötning enligt en tidigare studie av Davidsson (2007). I det andra fallet antogs att pastörisering inte medförde någon ökning av metanproduktionen jämfört med mesofil rötning vilket var fallet i pilotskaleförsök utförda på samma utrustning som i övriga försök under fyra veckors drift. Resultaten av samtliga beräkningar finns sammanfattade i tabell 6-13. Av resultaten framgår att den mesofila rötningen ger en högre energivinst än de termofila alternativen (55 och 60 °C) eftersom metanutbytet (för Sjölundas slam vid pilotrötningen) är ungefär lika högt som för rötning vid 55 °C och ca 10 % lägre vid 60 °C och energibehovet för uppvärmning till mesofil temperatur blir lägre (även om viss återvinning genom värmeväxling räknas med för termofil rötning). Alternativet att pastörisera slammet (70 °C, 60 minuter) före mesofil rötning ger den högsta energivinsten vid antagande om ökning av metanproduktionen med 20 % jämfört med enbart mesofil rötning. Om antagande att ingen ökad metanproduktion fås genom att pastörisera slammet är energivinsten lägre än för rötning vid 55 °C men fortfarande högre än för rötning vid 60 °C. Vidare framkommer av tabell 6-13 att den uppmätta (verkliga) biogasproduktionen vid fullskala är något högre än väntat utifrån pilotförsöken. Skillnaden kan bero på flera saker.

Att verket i fullskala använder sig av tätare in- och utmatningsintervall (3 h intervall jämfört med 24 h i försöket), vilket kan ge en jämnare belastning

Att verket i fullskala matar in fettavskiljarslam vars biogasbidrag inte fullt ut tagits med i beräkningen vid uppskalning från pilotskala till fullskala. I uppskalningen från pilot till fullskala fattas biogasproduktion från fettavskiljarslammet motsvarande ca 4 % av den totalt uppmätta produktionen.

Att verket i fullskala rötar slammet med en medeluppehållstid som är längre än i pilotförsöken (20 dygn respektive 15 dygn) och använder en lägre organisk belastning än i pilotförsöken (1,6–1,8 kg VS / m³, dygn respektive 2,0 kg VS / m³, dygn).

De antaganden som gjorts för beräkningarna finns redovisade i Appendix E, tillsammans med en skiss över systemet.

Tabell 6-13 Energibalans för rötning av blandslam vid olika temperaturer jämfört med drift i fullskala vid Sjölunda ARV i juni 2012 samt hela 2011.

| | ENERGI IN | | | | ENERGI UT | | |
|---|---------------|------------------|--------------------------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|
| | Elförbrukning | Värmeförbrukning | Återvinning genom värmeväxling | Summa | Rötgasproduktion | Energivinst | |
| | MWh/år | MWh/år | MWh/år | MWh/år | Nm ³ /år | MWh/år | MWh/år |
| Sjölunda 2011 35°C ≈20 dygns HRT | 1 038 | 7 438 | 0 | 8 476 | 5 300 000 | 33 125 | 24 649 |
| | MWh/månad | MWh/månad | MWh/månad | MWh/månad | Nm ³ /månad | MWh/månad | MWh/månad |
| Sjölunda juni 2012 35°C ≈20 dygns HRT | 90 | 644 | 0 | 734 | 437 741 | 2 729 | 1 995 |
| Mesofil 35°C, 15 dygns HRT | 90 | 620 | 0 | 710 | 383 812 | 2 485 | 1 775 |
| Termofil 55°C, 15 dygns HRT | 90 | 1 206 | 481 | 815 | 388 468 | 2 477 | 1 662 |
| Termofil 60°C, 15 dygns HRT | 90 | 1 353 | 481 | 962 | 358 272 | 2 214 | 1 252 |
| Pastörisering följt av 35 °C, 15 dygns HR (om 20% mer metan) | 90 | 1 584 | 540 | 1 134 | 460 574 | 2 982 | 1 848 |
| Pastörisering följt av 35 °C 15 dygns HRT (om 0% mer metan) | 90 | 1 584 | 540 | 1 134 | 383 812 | 2 485 | 1 351 |

7 Slutsatser

- Rötning av blandslam, 75 % primärslam och 25 % bioslam, går att etablera och driva stabilt vid 60 °C vid 7 dygns HRT. Rötning vid 60 °C gav dock ca 10 % lägre metanproduktion än rötning vid 55 °C eller 35 °C vilka båda gav liknande metanutbyte. Endast slam från Sjölanda ARV i Malmö utvärderades.
- Rötning vid mesofil temperatur ger ej tillräcklig hygienisering för att leva upp till de gränsvärden som föreslås inom EU respektive i Naturvårdsverkets förordningsförslag.
- Rötning vid 55 °C samt 60 °C ger god reduktion av *Salmonella*, *E.coli* och enterokocker och klarar de gränsvärden som föreslås inom EU. Det är även troligtvis tillräckligt för att leva upp till gränsvärdena i Naturvårdsverkets förordningsförslag vilket dock inte kan fastslås då slamprover måste centrifugeras för att kunna visas klara av gränsvärdet för enterokocker varvid analysmetoden frångås. Rötning vid 55 eller 60 °C, vid 7 eller 15 dygns HRT med 2 h minsta exponeringstid kan dock visas klara de av Naturvårdsverket föreslagna gränsvärdena för *E.coli* och *Salmonella*.
- Pastörisering vid 70 °C under 60 minuter ger ett slam som klarar av de gränsvärden som föreslås inom EU respektive de gränsvärden för *Salmonella* och *E.coli* som anges i Naturvårdsverkets förordningsförslag. I likhet med rötat slam måste analysmetoden för enterokocker frångås genom att proverna centrifugeras innan analys för att visa att pastöriserat slam klarar gränsvärdet för enterokocker.
- Vare sig pastörisering eller rötning visades ge någon generell reduktion av läkemedel. Ett fåtal läkemedel uppvisar tecken på reduktion men höga mätosäkerheter på slamprover gör att detta ej kan fastställas. Ingen skillnad sågs heller för temperatur (35, 55 eller 60 °C) eller exponeringstid. Behov av förbättrad analysmetod för läkemedel i slam behövs.
- Ingen kraftig reduktion av PAH kunde ses för rötning eller pastörisering av slam. Enskilda PAH uppvisar viss reduktion och i de fallen ger rötning vid 35 respektive 55 °C likartad reduktion medan 60 °C ger lägre reduktion. Ingen skillnad kunde ses för exponeringstid.
- Rötat slam ger en lägre gröningshämmning än orötat och pastöriserat slam. Ingen skillnad kunde ses mellan de rötade slamproverna för temperaturerna (35, 55 och 60 °C) eller för exponeringstiderna 24 respektive 6 h.
- Om hygienisering skall införas ger pastörisering följt av mesofil rötning den högsta energivinsten om 20 % ökad metanproduktion sker. Sker ingen ökning är den minst energikrävande hygieniseringsmetoden termofil rötning vid 55 °C.

8 Referenser

Ahhammad, Sk.Z. Gomes, J. & Sreekrishnan, T.R. (2008). Wastewater treatment for production of H₂S-free biogas. *Journal of chemical technology and biotechnology*, vol.83, ss.1163–1169.

Ahring, B.K., Ibrahim, A.A. & Mladenovska, Z. (2001). Effect of temperature increase from 55 to 65 °C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure. *Water Research*. Vol. 35, no.10, ss. 2446–2452.

Alsberg, T., Adolfsson-Erici, M., Lavén, M. & Yu, Y. (2009). Förekomst av läkemedel och deras metaboliter, samt östrogener, östrogenlika ämnen och triclosan i avloppsvatten som behandlats med moderna reningstekniker. Rapport. Stockholm: Institutionen för tillämpad miljövetenskap, Stockholms Universitet.

Bagge, E., Sahlström, L. & Albiñ, A. (2005). The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. *Water research*, vol.39, ss. 4879–4886.

Bernal-Martinez, A., Carrère, H., Patureau, D. & Delgenès, J.P. (2007). Ozone pre-treatment as improver of PAH removal during anaerobic digestion of urban sludge. *Chemosphere*, vol.68, no.6, ss.1013–1019.

Chen, Y., Cheng, J.J. & Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic processes: A Review. *Bioresource Technology*, 99, ss.4044–4064

Christensen, N., Batstone, D.J., He, Z., Angelidaki, I. & Schmidt, J.E. (2004). Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from sewage sludge by anaerobic degradation. *Water Science and Technology*. Vol.50, No. 9, pp. 237–244

Clarke, B., Porter, N., Symons, R., Blackbeard, J., Ades, P. & Marriott, P. (2008). Dioxin-like compounds in Australian sewage – Review and national survey. *Chemosphere*. Vol.72, No. 8, ss. 1215–1228

Clarke, B., Porter, N., Symons, Marriott, P. Stevenson, G.J. & Blackbeard, J. (2010). Investigating the distribution of polybrominated diphenyl ethers through an Australian wastewater treatment plant. *Science of the total environment*. Vol.408, No.7, ss.1604–1611.

Davidsson, Å. & la Cour Jansen, J. (2006). Pre-treatment of wastewater sludge before anaerobic digestion – Hygienisation, Ultrasonic treatment and Enzyme dosing. *Tidningen vatten*, no.62, ss.335–340.

Davidsson, Å. (2007). Increase of biogas production at wastewater treatment plants. Diss. Lunds Universitet. Lund: Media-Tryck.

EC (European Commission). (2001). Evaluation of sludge treatments for pathogens reduction. Luxemburg: Office for official publications of the European communities.

- EC (European Commission). (2010). Working document, Sludge and biowaste. Brussels: Directorate-general environment.
- EC (European Commission). (2012). Proposal for a directive of the European parliament and of the council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Brussels: European Commission.
- EU-SEPP (2011). Guidlinjer för provtagning. http://www.sampler-education.dhi.dk/project_results/textbooks_on_sampling.asp [2012-01-02].
- Falås, P., Andersen, H. R., Ledin, A., & la Cour Jansen, J. (2012a). Occurrence and reduction of pharmaceuticals in the water phase at Swedish wastewater treatment plants. *Water science & Technology*. Vol.66, no. 4, ss.783–791.
- Falås, P., Baillon-Dhumez, A., Andersen, H. R., Ledin, A., & la Cour Jansen, J. (2012b). Suspended biofilm carrier and activated sludge removal of acidic pharmaceuticals. *Water research*. Vol.46, ss. 1167–1175.
- Fick, J., Lindberg, H. L., Kaj, L. & Brorström-Lundén, E. (2011). *Results from the Swedish National Screening programme 2010 – Subreport 3. Pharmaceuticals*. Rapport Svenska Miljöinstitutet (IVL)
- Fick, Jerker. Kemiska Institutionen Umeå Universitet, Personlig intervju 8 oktober 2012.
- Gallert, C. & Winter, J. (1997). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic wastes: effect of ammonia on glucose degradation and methane production. *Applied Microbiological Biotechnology*, 48, 405–410
- Gavala, H.N., Yenal, U., Skiadas, I.V., Westermann, P. & Ahring, B.K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water research*. Vol. 37, ss. 4561–4572.
- Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Hoboken (USA): John Wiley & Sons Inc.
- Haghighatafshar, S. (2011). Pathogen-reduction at thermophilic temperatures with aerobic and anaerobic sludge-stabilization methods – A literature review. Rapport: Lund, Institutionen för kemiteknik Lunds Universitet.
- Hedlund, Gunilla. Naturvårdsverket. Personlig intervju 2012-09-18.
- Henze, M., Harremoës, P., la Cour Jansen, J. & Arvin, E. (2002) *Wastewater Treatment*. Berlin: Springer-Verlag
- Hörsing, M., Ledin, A., Grabic, R., Fick, J., Tysklind, M., la Cour Jansen, J. & Andersen, H.R. (2011). Determination of sorption of seventy-five pharmaceuticals in sewage sludge. *Water research*. Vol. 45, ss.4470–4482.
- Jarvis Å. & Schnürer, A. (2009). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. Rapport SGC 207. Svenskt Gastekniskt Center

- Khanal, K.S. (2008). *Anaerobic Biotechnology for bioenergy production – principles and applications*. Ames (Iowa, USA): Wiley-Blackwell.
- Lu, J., Gavala, H.N., Skiadas, I.V., Mladenovska, Z. & Ahring, B.K. (2008). Improving anaerobic sewage sludge digestion by implementation of a hyper-thermophilic prehydrolysis step. *Journal of environmental engineering*. Vol. 88, ss. 881–889.
- Mata-Alvarez J. (2003). *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. Padstow: TJ International (Ltd)
- Miljödepartementet (2012). Regeringsbeslut: Uppdrag om hållbar återföring av fosfor. Utskickat 2012-02-02.
- Naturvårdsverket (1995). Användning av slam i jordbruket. Naturvårdsverkets. Rapport 4418. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Naturvårdsverket (2002). Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Naturvårdsverket (2003). Organic contaminants in sewage sludge. Rapport 5217. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Naturvårdsverket (2008). Rapport 5794: Avloppsreningsverkens förmåga att ta hand om läkemedelsrester och andra farliga ämnen. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Naturvårdsverket (2010). Uppdatering av ”Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp”. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Nozhevnikova, A.N., Kotsyurbenko, O.R. & Parshina, S.N. (1999). Anaerobic manure treatment under extreme temperature conditions. *Water Science & Technology*, vol.40, no1, ss 215–221.
- Olofsson, U. (2012). Removal processes in sewage treatment plants – Sludge quality and treatment efficiency of structurally diverse organic compounds. Diss. Umeå Universitet. Umeå: VMC, KBC.
- Olsen, J.E. & Larsen, H.E. (1987). Bacterial decimation times in anaerobic digestions of animal slurries. *Biological waste*, vol.21, ss.153–168.
- Patureau, D. & Trably, E. (2006). Impact of Anaerobic and Aerobic Processes on PolyChloroBiphenyl Removal in Contaminated Sewage Sludge. *Biodegradation*, vol. 17, no. 1, ss.9–17.
- REVAQ. (2012). *Regler för certifieringssystemet REVAQ Återvunnen växtnäring*. Rapport 2.2. Stockholm, Svenskt Vatten.
- Sahlström, L. (2003). A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresource technology*, vol.87, ss.161–166.
- Sahlström, L. Aspan, A. Bagge, E. & Danielsson-Tham, M.L. Albiñ, Ann. (2004). Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water research*, vol.38, ss.1989–1994.

- Sahlström, L. (2008). A laboratory study of survival of selected microorganisms after heat treatment of biowaste used in biogas plants. *Bioresource technology*, vol.99, ss.7859–7865.
- Sandström, Disa (2011) Processingenjör Sjölanda reningsverk, VA SYD. Mailkontakt 2012-01-04.
- Scherer, P.A., Dobler, S., Rohardt, S., Looock, R., Büttner, B., Nöldeke, P. & Brettschuh, A. (2003). Continuous biogas production from fodder beet silage as sole substrate. *Water science and technology*, vol.48, no.4, ss.229–233.
- Tchobanoglous G., Burton F. L. & Stensel H.D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse 4th ed.* New York McGraw-Hill Companies
- Trably, E., Patureau, D. & Delgenes, J.P. (2003). Enhancement of polycyclic aromatic hydrocarbons removal during anaerobic treatment of urban sludge. *Water Science & Technology*. Vol. 48, no. 4, ss. 53–60
- VA SYD. (2010). Miljörapport – Sjölanda avloppsreningsverk 2010. Malmö, VA SYD.
- Van Lier, J.B., Hulsbeek, J. J.M., Stams, A. & Lettinga G. (1993). Temperature Susceptibility of thermophilic sludge: Implications for reactor start-up and operation. *Bioresource Technology*, vol. 43, ss. 227–235
- Van Lier, J.B., Tilche, B.K., Ahring, H., Macarie, R., Moletta, M., Dohanyos, L.W., Hulshoff, P., Lens, P. & Verstraete, W. (2001). New Perspectives in anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, vol.43, No.1, ss.1–18.
- Verlicchi, P., Al Aukidy, M. & Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment – A review. *Science of the Total Environment*, No. 429, ss.123–155
- Wahlberg, C., Björlenius, B. & Paxéus, N. (2010). Läkemedelsrester i Stockholms vattenmiljö. Stockholm: Stockholm Vatten.
- Wang, Q., Noguchi, C., Hara, Y., Sharon, C., Kakimoto, K. & Kato, Y. (1997). Studies on anaerobic digestion mechanism: Influence of pretreatment temperature on biodegradation of waste activated sludge. *Environmental technology*. Vol. 18, ss. 999–1008.
- Watanabe, H., Kitamura, T., Ochi, S. & Ozaki, M. (1997). Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions. *Water science and technology*, vol.36, no.6-7, ss.25–32.
- Zehnder, J.B.A. (red.). (1988). *Biology of anaerobic microorganisms*. New York: John Wiley & sons.
- Zinder, S.H. Anguish, T. & Cardwell S.C. (1984) Effects of temperature on methanogenesis in a thermophilic (58 °C) anaerobic digester. *Applied and environmental microbiology*, vol. 47 no.4, ss. 808–813.

Zinder, S. H. (1990). Conversion of acetic acid to methane by thermophiles. *FEMS Microbiology reviews*, vol.75, ss.125–138.

Zitomer, D.H. & Speece, R.E. (1993). Sequential environments for enhanced biotransformation of aqueous contaminants. *Environmental science & Technology*. Vol. 27, no. 2, ss.226–244.

Økland, T.E., Wilhelmsen, E. & Solevåg, Ø. (2005). A study of the priority substances of the Water Framework Directive. Rapport: Oslo, Bergfald & Co.

Appendix A.

Provtagning och standardanalys av biogas och slam

Provtagning

Vid provtagning på och analys av rötslam gjordes detta ej på den första litern uttaget rötslam. Detta för att undvika att få ett ohomogeniserat prov på grund av eventuell sedimentering eller formation av dödzoner i reaktorerna. Alla prover och analyser gjordes därför på volymer uttagna direkt efter den första litern rötslam. Vid provtagning bars vinylhandskar. Alla temperaturer mättes med en termometer av märket Ama-digit ad 15th PRECISION (-40 till 120 °C) som tidigare testats mot 4 nya termometrar av samma märke och funnits överensstämma väl.

För provtagning av rötslam till patogenanalys togs prover ut i plastbägare och hälldes sedan direkt över i provbehållare av plast som förseglades och placerades i vattenbad för att kylas. Vattenbadets temperatur vid start var 20 °C och från och med att proverna sattes i så sänktes temperaturen successivt ned till 4 °C under 60–90 minuter. Därefter transporterades proverna för analys i frigolitisolerad förpackning tillsammans med kylklampar som ej låg i direktkontakt med provtagningsbehållarna. Proverna anlände senast 23 h efter provtagning till analys.

I fallen för analys av centrifugerade slamprover (provserier J och K) förbereddes proverna på följande vis. Prover togs ut i plastbehållare och fördes sedan direkt till labb för centrifugering. Transporten tog som längst 40 minuter. Proverna centrifugerades sedan vid 3 000 rpm under 20 min i en centrifug av märket Sorvall GLC-2 varefter det sedimenterade slammet skrapades ur och placerades i provbehållare av plast som förseglades och placerades i kylrum vid 5 °C. Därefter transporterades proverna till analys i frigolitisolerad förpackning tillsammans med kylklampar som ej låg i direktkontakt med provtagningsbehållarna. Proverna anlände senast 23 h efter provtagning till analys.

För provtagning av rötslam till analys för tungmetaller, PCB och läkemedel togs prover ut i plastbägare och hälldes sedan direkt över i provbehållare av plast som förseglades och direkt placerades i frys vid -18 °C. Alla prover fraktades sedan efter försökets slut tillsammans för analys. För prover till analys för tungmetaller och PCB tog frakten mindre än två timmar och proverna förvarades under tiden i kylväska och var fortfarande frysta vid ankomst. För proverna till analys av läkemedelsrester förpackades proverna i kylväska isolerad med frigolit och kylklampar och levererades inom 24h.

Alla prover på orötat blandslam tillreddes genom att primärslam och bioslam blandades i plastbehållare vilken sedan agiterades varefter provvolymen hälldes över i provbehållare. Denna placerades antingen direkt i vattenbad för att kylas för att skickas till patogenanalys eller direkt i frys om analys skulle ske för tungmetaller, PCB eller läkemedelsrester. Prover på slam som upphettades till 70 °C tillreddes på samma sätt som för orötat slam varpå de

placerades i värmebad med en temperatur av 72–73 °C. Samtidigt placerades ytterligare en identisk provbehållare med slam i värmebadet för temperaturkontroll. Denna hade som enda undantag ett litet hål i locket där en termometer var nedsänkt. När temperaturen i kontrollbehållaren nått 70 °C så sänktes temperaturen på värmebadet till 71 °C varpå proverna stod kvar i badet under en timma. Temperaturen i kontrollerna varierade som högst ± 1 °C under denna timma för alla provomgångar. Tiden för upphettning av kontrollen till 70 °C varierade beroende storleken på provbehållaren. Tiden för upphettning av prover för patogenanalys tog mellan 26–34 minuter, för tungmetalls och PCB-analys mellan 41–55 minuter och för analys av läkemedelsrester mellan 26–30 minuter. Efter upphettning placerades prover för analys av patogener direkt i vattenbad för att kylas som beskrivet ovan och övriga prover direkt i frys som beskrivet ovan.

Standardanalyser av biogas och slam

Under hela försöket analyserades biogas, rötslam från respektive reaktor samt orötat slam. Analys på biogasen i gasklockorna gjordes innan nollställning av gasvolym samt innan analyser på rötslam gjordes. Analys på biogasen utfördes dagligen och inkluderade temperatur, gastryck samt gassammansättning. Temperatur mättes i vattenbaden till gasklockorna med en termometer av märket Ama-digit ad 15th PRECISION (-40 till 120 °C) och gastryck avlästes genom okulär besiktning av vattenkolonnerna på gasklockorna varefter gasvolym beräknades. Gassammansättningen mättes med portabelt gasmätare av märke SEWERIN SR2-DO vilken angav volymprocent CH_4 , CO_2 , O_2 samt ppm H_2S .

Rötslam analyserades en till två gånger per vecka vid institutionen för kemiteknik vid LTH. Uttag av rötslam skedde efter att gasvolym nollställts men innan inmatning av substrat till reaktorerna. Rötslammet förvarades under frakt i plastbehållare och total tidsrymd innan analys var som högst tre timmar. Analys skedde för ammoniumkväve ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), total alkalinitet (TA) och de lättflyktiga fettsyror acetat och propionat. Under försökets sista sex veckor analyserades rötslammet även för torrsubstanshalt (TS) och glödförlust (VS) enligt standard SS028113 med undantag av att formar av aluminium användes som indunstningsskålar. Proverna för analys av ammoniumkväve, acetat och propionat förbereddes genom att rötslam från respektive reaktor centrifugerades vid 13 000 rpm under 10 minuter i centrifug av märket Centronix (1236 V) och sedan filtrerades genom filterpapper med en filterhastighet på 10 ml/110 s och porstorlek 2–3 μm . För ammoniumkväve spädades sedan 100 μl av respektive centrifugerat och filtrerat prov med 4 900 μL destillerat vatten varefter Dr.Lange ampuller LCK 303 användes för att fastställa koncentrationer av $\text{NH}_4^+\text{-N}$. För analys av fettsyror acetat och propionat konserverades 0,9 ml centrifugerat prov med 0,1 ml tioprocentig fosforsyra. Därefter fastställdes koncentrationer genom analys i gaskromatograf av märket Agilent 6850 A utrustad med en flame ionisation detector (FID) och en 25 m (längd), 0,32 μm (diameter), 0,5 μm (tjocklek) kolonn. Total alkalinitet mättes på obehandlat rötslam och analyserna utfördes enligt europeisk standard EN ISO 9963-1 med undantag av att en provvolym på 25 ml användes istället för det föreskrivna 100 ml.

Orötat slam analyserades under hela försöket för $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TA, TS, VS samt acetat och propionat. Dessa analyser skedde som ovan med undantaget att prover för $\text{NH}_4^+\text{-N}$ späddes med 100 μl istället för 4 900 μl .

SVAs synpunkter på resultatet av hygieniseringsstudie inom projektet:

Rötning av slam vid 35, 55 och 60°C - utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och andra industrikemikalier

Erik Helmersson, Josefine Elving och Ann Albihn, Statens Veterinärmedicinska Anstalt, Enhet för Kemi, Miljö och Fodersäkerhet, Sektionen för Miljö och smittskydd

SYFTE

Hygieniseringsstudien syftar till att:

jämföra effekten på inaktivering av mikroorganismer vid rötning i 35, 55 och 60°C för att utvärdera om 60°C resulterar i en avsevärt högre inaktivering.

- jämföra exponeringstiderna 2, 5, 6 och 24 timmar med avseende på inaktivering av mikroorganismer.

SAMMANFATTANDE SYNUNKTER

- Vid tolkning av mikrobiologiska analysresultat bör man tänka på att det kan finnas metodfel som orsakar falskt positiva resultat. T.ex. så kan proverna förorenas i samband med eller efter provtagning om inte en strikt rutin följs. SVA har inte hanterat proverna förens dessa anlänt till vårt laboratorium för analys. Vidare finns alltid en biologisk variation som gör att vissa stammar av bakterier kan vara tåligare än andra. Om hygienisering sker vid temperaturer som ligger nära vad bakterierna tolererar så kan sådana tåliga stammar överleva den hygieniserande behandlingen.
- Samtliga prover från det obehandlade blandslammet och efter mesofil rötning innehöll *Salmonella*. Efter termofil behandling samt efter pastörisering vid 70°C 60 min kunde ingen *Salmonella* detekteras.
- Vid analys av enterokocker i ocentrifugerat slam resulterar omräkning från CFU/g våtvikt till CFU/g torr substans i att detektionsgränsen för analysmetoden är högre än reduktionskravet på 1000 CFU/g vårvikt och därmed kan inte fullgod hygienisering påvisas. Analysmetoder och TS-halten är därför en viktig parameter om slammet skall klara kravet från Naturvårdsverket på en fullgod hygienisering.
- För enterokocker i centrifugerat slam uppnås hygieniseringskravet i samtliga exponeringstider (2 och 24h) och hydragiska retentionstider (7 eller 15 dagar) vid termofil rötning i 55, 60°C samt vid pastörisering i 70°C 60 minuter. Mesofil rötning (35°C) uppfyller inte reduktionskravet.
- Analys av *E. coli* tyder på att en fullgod hygienisering med avseende på *E. coli* kan uppnås vid en exponeringstid av 2h oavsett hydragisk retentionstid (7 eller 15 dagar) vid 60°C och likväl med en hydragisk retentionstid av 15 dagar i 55°C. Det här stöds även av resultaten från koliforma bakterier och termotoleranta bakterier. Vid rötning i 55°C, hydragisk retentionstid av 7 dagar och exponeringstiden 2,5h uppfylls inte reduktionskravet i ett av två prover, detta trots att resultaten från exponeringstiden 2h tyder på att en fullgod

hygienisering uppnås. Detta åskådliggör problematiken med för få provtagningar och den osäkerhet som detta resulterar i.

- Clostridier finns i höga koncentrationer i både obehandlat och behandlat slam. *Clostridium spp.* är en heterogen grupp. Därför är det svårt att dra generella slutsatser om effekt av hygienisering för hela denna grupp på grundval av enbart någon av clostridiearterna. *C. perfringens*, som analyserats i denna studie, bildar stabila sporer som överlever i temperaturer >60°C (Bagge 2009). Då slamsammansättningen kan variera över året så varierar även den ingående halten av *C. perfringens* och sammansättningen av *Clostridium spp.* Att titta på det totala Clostridier-antalet blir därför inte något bra mått på inaktivering.
- Studien tyder på att en exponeringstid av 2h skulle kunna vara tillräcklig för rötning vid 55 likväl som 60°C för att uppnå reduktionskraven för *Salmonella*, enterokocker samt *E. coli*. Dock bygger studien på endast ett fåtal provtagningar (som närmast kan liknas vid stickprovtagningar) för varje exponeringstid vilket begränsar möjligheten att dra generella slutsatser från de resultat som framkommit. Antalet prover är för litet för att utföra en relevant statistisk analys och osäkerheten i resultaten är mycket stor. För en fullgod validering av metoderna är ytterligare studier därför ett måste.

DEFINITIONER

Minimal exponeringstid (samma som MRT): Den tid då inget slam tas ut eller tillförs reaktorn.

Hydraulisk uppehållstid (HRT): Den totala effektiva volymen delat med inpumpad volym per dygn, vilket motsvarar den genomsnittliga tiden slammet uppehåller sig i reaktorn.

BAKGRUND

Projektet ”Rötning av slam vid 35,55 och 60°C – utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och andra industrikemikalier” drivs av VA-teknik, Institutionen för Kemiteknik på Lunds Tekniska Högskola och finansieras av Svenskt Vatten. De mikrobiologiska analyserna, resultatbearbetning av analysvar samt avrapportering av dessa har utförts av SVA, Uppsala.

Slam från reningsverk innehåller många viktiga växtnäringsämnen, såsom kväve och fosfor, vilka i större utsträckning skulle kunna återföras till jord, skog och mark. Spridning av avloppsslam på jordbruksmark regleras av nationella och internationella guide-lines och lagar t.ex. Europeiska Rådets direktiv 86/278/EEG. Ett ökat kunskapsläge rörande riskerna, med eventuell smittspridning från slammet, läckage av tungmetaller och annan eventuell påverkan på naturen, har lett till att ett arbete med att se över hantering och spridning av slam har inletts. Bland annat görs en översyn av EUs direktiv och en ny slamförordning är under utarbetning hos Naturvårdsverket. År 2009 gav regeringen i sitt regleringsbrev Naturvårdsverket i uppdrag att revidera sin aktionsplan för återförande av fosfor från avlopp till naturen. I det uppdraget ingick det att göra en konsekvensanalys av olika behandlingsmetoder av avloppsslam utifrån ett hälso- och miljöperspektiv. I februari 2012 beslutades det att det skall utökas till ett särskilt uppdrag till Naturvårdsverket för hållbar återföring av fosfor.

För att få ett fullgod hygienisering, enligt klass A och B, av slammet, i enlighet med föreslaget i EUs slamdirektiv (2010), så krävs pastörisering vid 70°C i 60 min eller annan alternativ behandling som kan uppvisa samma reduktion av *E. coli* och avsaknad av *Salmonella* i 25-50g prov. I enlighet med det förslag till slamförordning som utarbetas av Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2010) krävs total avsaknad av *Salmonella* i 25g behandlat slam, detta överensstämmer även med de

reduktionskrav som ställs i EUs slamdirektiv (EU 2010). Vidare krävs av den valda hygieniseringsmetoden att behandlingen reducerar *E. coli* och *Enterokocker* till <1000 CFU/g TS (< 3 log₁₀ CFU/g TS). Denna siffra är i EU's slamdirektiv < 5 log₁₀ CFU/g våtvikt i behandlat slam för *E. coli*. För *Enterokocker* finns ingen motsvarande siffra i EU's slamdirektiv och SVA har i sin avrapportering valt att se till de reduktionskrav som föreslås i Naturvårdsverkets nya slampförförordning.

MATERIAL OCH METODER

Rötning på laboratoriet gjordes i experimentrötningskammare uppsatta på Sjölanda avloppsreningsverk av Hamse Kjerstadius och personal från Lunds Tekniska Högskola (LTH). Pastörisering i vattenbad och provtagning sköttes helt av Hamse Kjerstadius.

Försöksupplägg och provtagning

Orötat slam (primär- och bioslam) hämtades varje söndag från Sjölanda avloppsreningsverk (Malmö). Det orötade blandslammet, som användes till experimentet, blandades i proportioner av 75% primärslam och 25% bioslam. Det förvarades sedan i kyl (4-5°C) tills inmatning i systemet.

I laboratorieförsöket användes 20 liters rötningskammare, en för varje temperatur (35°, 55° och 60°C) och rötningssupphållstid (7 dagar och 15 dagar) med exponeringstid på 2, 2.5, 6 och 24h. Innan första provtagningen kördes reaktorerna tills dess att en kemisk stabilitet (alkalinitet, pH, NH₃/NH₄⁺) uppnåts. Det här tog 45 dagar efter att alla parametrar var slutgiltigt inställda, vilket motsvarar minst 3*HRT för alla reaktorer. Reaktorerna matades var 24h med nytt obehandlat blandslam från kyl mellan provtagningarna. För att erhålla rätt retentionstider för slammet i samband med provtagning ändrades matningen från 24h till den aktuella exponeringstiden 24h innan en provtagning skulle ske. Vid provtagning tappades först en volym slam ut och kasserades för att säkerställa att slammet som skickades till SVA för analys inte kom från utloppsröret. Därefter tappades slam från reaktorerna ut i större kärl och ca 100ml togs från detta till analys.

Vid 70°C utfördes satsvis pastörisering under 60 min, här användes det orötade blandslammet från kylan. Samtidigt lades provet med det orötade blandslammet i kylbad. Det här utfördes vid varje provomgång (6 gånger totalt). De två första provomgångarna (serie A och B) med pastöriserat slam 70°C 60 min kasserades på grund av tekniska problem.

Totalt togs åtta provomgångar (A till I) med 7 prover av ocentrifugerat slam i varje, se Tabell 1. Två extra provomgångar (J och K), med 7 prover i varje, med centrifugerat slam togs också för enbart Enterokockanalys. Proverna kylades i vattenbad i 60-90 minuter, genom successiv temperatursänkning från 20°C nedtill 4°C, innan de lades ned i frigolitlåda med kylklampar och sedan sändes till SVA så de kom fram inom 24h.

Analysmetoder

Mikrobiologiska analyser har genomförts enligt gällande NMKL-metoder för *Enterokocker*. (NMKL 68:4:2004), Koliforma 37 (NMKL 44:6:2004), 44 grader och *E.coli* (NMKL 125:4:2005), Salmonella (NMKL 71:5:1999). Clostridiesporer har analyserats med en metod, som bygger på, gamla NMKL-metoden och Bakteriologens nuvarande metod för att typa clostrider i allmänbakteriologiska prover. Se nedan:

Clostridium perfringens odlas på TSC med D-cyclocerin i 24 tim 37°C i anaerob miljö, 5 kolonier renodlas till lecitasplattor och hästblod. Inkuberas i 37°C i 24 tim i anaerob miljö. Positiva kolonier är lecitaspositiva och har hemolys.

Mätosäkerheten för NMKL-metoderna är generellt ± 10 %.

Tabell 1. Förteckning över vilken serie som motsvarar exponeringstid och provtagningsdatum.

| Provtagningsdatum | Serie ^a | Exponeringstid (h) |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| 2011-09-12 | A | 24 |
| 2011-09-19 | B | 24 |
| 2011-10-12* | K | 24 |
| 2011-09-27 | D | 6 |
| 2011-10-05 | G | 6 |
| 2011-10-03 | E | 2,5 |
| 2011-10-10 | H | 2,5 |
| 2011-10-04 | F | 2 |
| 2011-10-11 | I | 2 |
| 2011-10-11* | J | 2 |

* prover endast analyserade med avseende på *Enterokocker*;

^a Serie A-K motsvarar en provomgång på 7 prover i varje.

Statistisk analys

SVA har valt att istället för reella värden jämföra medelvärden och standardavvikelse för varje exponeringstid och det pastöriserade slammet vid 70°C 60 min. Detta på grund av att det inte fanns någon direkt koppling mellan det obehandlade slammet och det slam, som provtagits från reaktorerna, för varje provtagningsomgång. Det gäller dock inte det pastöriserade slammet, som varit satsvis pastöriserat. Där har medelvärde och standardavvikelse valts för att få ett mer statistiskt underlag och korrigera för eventuella naturliga skillnader i slammet från de olika provtagningsomgångarna.

RESULTAT FRÅN MIKROBIELLA ANALYSER

Vid ankomst till SVA höll proverna en temperatur på 4,9–13,5°C.

Salmonella

Samtliga prover från det obehandlade blandslammet och efter mesofil rötning var positiva för *Salmonella*. Efter termofil rötning samt efter pastörisering vid 70°C 60 min kunde ingen *Salmonella* påvisas.

Enterokocker

Studier utförda på ocentrifugerat slam med en torrsubstanshalt (TS-halt) på 1,4–4,2 %, obehandlat och behandlat, visar på värden som i samtliga fall överstiger det tillåtna gränsvärdet på 3 log₁₀ CFU/g TS i Naturvårdsverkets nya slamförfordning, se tabell 2. Det pastöriserade ocentrifugerade slammet vid 70°C 60 min med ett ingående värde av 4,82 ± 0,52 log₁₀ CFU/g TS (n=8) på obehandlat och ett utgående värde efter behandling på 3,36 ± 0,05 log₁₀ CFU/g TS (n=6) klarar inte heller Naturvårdsverkets hygieniseringskrav för *Enterokocker*.

Analys av data från ocentrifugerat slam med omräkning från CFU/g våtvikt till CFU/g TS medför att detektionsgränsen långt överstiger det tillåtna gränsvärdet på 3 log₁₀ CFU/g TS.

Vid analys av centrifugerat slam, med TS-halt på 11,9–20%, uppnås hygieniseringskravet i samtliga behandlingar vid 55, 60°C, se tabell 3, och pastöriserat slam 70°C 60 min. Dock uppfyller inte 35°C behandlingskravet, vilket inte är förvånande då tidigare studier visat på att inaktivering är låg vid mesofil rötning. (Lang and Smith 2008; Vo Thi, Clemens et al. 2009).

Tabell 2. Medelvärden och standardavvikelser i log₁₀ CFU/g TS för Enterokocker på ocentrifugerat slam. n=2. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i fet stil. HRT i dagar(d). 3 log₁₀ = 1000 CFU

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam ^a | 35°C, 15 d HRT | 55°C, 7 d HRT | 55°C, 15 d HRT | 60°C, 7 d HRT | 60°C, 15 d HRT |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|-------------------|
| 24 | 5,38±0,66 | 4,31±0,93^b | 3,62±0,01 | 3,80±0,10 | 3,62±0,01 | 3,65±0,02 |
| 6 | 4,75±0,17 | 4,64±0,25 | 3,62±0,02 | 3,70±0,09 | 3,61±0,02 | 3,65±0,02 |
| 2,5 | 5,19±0,90 | 5,14±0,31 | 3,63±0,00 | 3,72±0,06 | 3,61±0,02 | 3,65±0,01 |
| 2 | 4,52±0,19 | 4,73±0,37 | 3,63±0,00 | 3,72±0,06^b | 3,61±0,02 | 3,65±0,01 |

^a 75% Primär, 25% Bioslam; ^b enbart 1 värde under detektionsgräns

En jämförelse av resultaten från centrifugerat och ocentrifugerat slam visar på att TS-halten är en viktig parameter om slammet skall klara kravet från Naturvårdsverket på fullgod hygienisering.

Tabell 3. Reella värden i log₁₀ CFU/g TS för Enterokocker på centrifugerat slam. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i fet stil. HRT i dagar(d).

| Exponeringstid (h) | Centrifugerat obehandlat blandslam ^a | 35°C, 15 d HRT | 55°C, 7 d HRT | 55°C, 15 d HRT | 60°C, 7 d HRT | 60°C, 15 d HRT |
|-----------------------|---|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 2 | 5,00 | 4,78 | 2,80 | 2,83 | 2,87 | 2,70 |
| 24 | 5,17 | 5,08 | 2,93 | 2,83 | 2,91 | 2,82 |

^a 75 % Primär, 25 % Bioslam

Presumptiva *E. coli*

Resultat från analyser av *E. coli* är sammanfattade i tabell 4. Samtliga prover analyserade efter termofil rötning klarar hygieniseringskravet, förutom 55°C med 7 dagars HRT och 2,5h exponeringstid. Även slam pastöriserat vid 70°C, 60 min med ingående värde av $7,33 \pm 0,33$ log₁₀ CFU/g TS på obehandlat blandslam visade efter behandling ett utgående värde av $236 \pm 0,05$ CFU/g TS (n=6), klarar däremot kravet. Däremot uppfyller den mesofila rötningen inte hygieniseringskravet oberoende av exponeringstid.

Värt att notera är att i arbetsdokument för EUs nya slamdirektiv finns det, till skillnad från i Naturvårdsverkets förslag till nytt slamdirektiv, angivet att *E. coli* skall reduceras till < 5 log₁₀ CFU/g våtvikt för behandlat slam. Därmed tyder resultaten från denna studie på att även en mesofil rötning kan uppfylla detta krav föreslaget av EU, se tabell 5.

Tabell 4 Medelvärden och standardavvikelse i log₁₀ CFU/g TS för *E. coli* på ocentrifugerat slam. n=2. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i **fet stil**. HRT i dagar(d). 3 log₁₀ = 1000 CFU

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam ^a | 35°C, 15 d HRT | 55°C, 7 d HRT | 55°C, 15 d HRT | 60°C, 7 d HRT | 60°C, 15 d HRT |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|
| 24 | 7,53±0,22 | 5,24±0,03 | 2,62±0,01 | 2,80±0,10^b | 2,62±0,01 | 2,65±0,02 |
| 6 | 7,35±0,23 | 5,40±0,27 | 2,62±0,02 | 2,70±0,09 | 2,61±0,02 | 2,65±0,01 |
| 2,5 | 7,49±0,41 | 5,75±0,08 | 3,04±0,58^b | 2,72±0,06 | 2,61±0,02 | 2,65±0,01 |
| 2 | 7,15±0,43 | 5,59±0,25 | 2,63±0,00 | 2,72±0,06 | 2,61±0,02 | 2,65±0,01 |

^a 75% Primär, 25% Bioslam; ^b enbart 1 värde under detektionsgräns

Tabell 5. Medelvärden och standardavvikelse i log₁₀ CFU/g våtvikt för *E. coli* på ocentrifugerat slam.n=2. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i fet stil. HRT i dagar(d). 3 log₁₀ = 1000 CFU.

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam ^a | 35°C, 15 d HRT |
|--------------------|-----------------------------------|----------------|
| 24 | 6,13±0,24 | 3,60±0,04 |
| 6 | 5,97±0,25 | 3,75±0,26 |
| 2,5 | 6,14±0,48 | 4,07±0,10 |
| 2 | 5,80±0,49 | 3,92±0,23 |

^a 75% Primär, 25% Bioslam

Koliformer

Resultatet från analyser av totala koliformer är sammanfattade i tabell 6.

Pastöriserat slam 70°C 60 min hade ett ingående värde på 670 ± 0,13 log₁₀ CFU/g våtvikt (n=8) på obehandlat och utgående värde av 1,00 ± 0,00 log₁₀ CFU/g våtvikt (n=6) på det behandlade.

För det totala antalet koliforma bakterier 37°C, finns inga gränsvärden angivna, men den fungerar dock som en indikator för kvalitén på hygieniseringen. Genom att titta på totala antalet koliformer får man ett bra underlag för att kunna tolka resultatet för presumtiva *E.coli* och se om det är rimligt. I det här fallet stödjer resultatet på totala koliforma bakterier 37°C resultatet på *E. coli* bra. Dock sticker 2,5h exponeringstid ut för 55°C, 60°C med 7 och 15 dagars HRT ut bland resultaten, då ett av värdena ligger över detektionsgränsen för metoden

Tabell 6. Medelvärden och standardavvikelse i log₁₀ CFU/g våtvikt för totala antalet koliformer 37°C på ocentrifugerat slam. n=2. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i fet stil. HRT i dagar(d).

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam ^{a, b} | 35°C, 15 d HRT | 55°C, 7 d HRT | 55°C, 15 d HRT | 60°C, 7 d HRT | 60°C, 15 d HRT |
|--------------------|--------------------------------------|----------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|
| 24 | 6,60±0,07 | 3,64±0,06 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |
| 6 | 6,74±0,09 | 4,12±0,54 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |
| 2,5 | 6,68±0,01 | 4,40±0,14 | 1,52±0,74^b | 1,00±0,00 | 1,24±0,34^b | 1,50±0,71^b |
| 2 | 6,69±0,26 | 4,30±0,09 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |

^a75% Primär, 25% Bioslam; ^b enbart 1 värde under detektionsgräns

Termotoleranta koliformer

Resultatet från analyser av termotoleranta koliformer är sammanfattade i tabell 7.

Pastöriserat slam i 70°C 60 min hade ett ingående värde på 6,05 ± 0,35 log₁₀ CFU/g våtvikt (n=8) på obehandlat och utgående värde av 1,00 ± 0,00 CFU/g våtvikt (n=6) på det behandlade.

Tabell 7. Medelvärden och standardavvikelse i log₁₀ CFU/g våtvikt för termotoleranta koliformer på ocentrifugerat slam. n=2. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i fet stil. HRT i dagar(d).

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam ^{a, b} | 35°C, 15 d HRT | 55°C, 7 d HRT | 55°C, 15 d HRT | 60°C, 7 d HRT | 60°C, 15 d HRT |
|--------------------|--------------------------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| 24 | 6,19±0,32 | 3,60±0,04 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00^b | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |
| 6 | 6,02±0,18 | 3,75±0,26 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |
| 2,5 | 6,34±0,19 | 4,07±0,10 | 1,46±0,65^b | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |
| 2 | 5,80±0,49 | 3,92±0,23 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 | 1,00±0,00 |

^a75% Primär, 25 % Bioslam; ^benbart 1 värde under detektionsgräns

Termotoleranta koliformer är det totala antalet koliformer, som växer vid 44°C (inklusive *E. coli*). Några gränsvärden; finns inte heller på termotoleranta koliformer men även dessa kan tjäna som en indikator på hygieniseringskvaliteten. Resultatet över termotoleranta koliformer är mycket överstämmande med resultatet på *E. coli* vilket var förväntat.

Clostridium perfringens

Clostridium spp. är en heterogen grupp och det är därför svårt att dra generella slutsatser om kvaliteten på hygieniseringen för hela denna grupp på grundval av enbart någon av clostridiearterna. *C. perfringens*, som analyserats i denna studie, bildar stabila sporer som överlever i temperaturer >60°C (Bagge 2009). Då slamsammansättningen kan variera över året påverkar det även den ingående halten av *C. perfringens* och även sammansättningen av *Clostridium spp.* att variera. Att titta på totala Clostridier-antalet blir därför inte något bra mått på inaktivering

Resultat från analyser av *C. perfringens* är sammanfattade i tabell 8. Analys av samtliga data från obehandlat blandslam visar på en stor spridning i antalet organismer med ett medelvärde på 4,33 log₁₀ CFU/g våtvikt och en standardavvikelse på 1,63 log₁₀ CFU/g våtvikt (n=8). Resultaten som presenteras nedan tyder på att ingen reduktion av *C. perfringens* uppnås under rötning i temperaturer mellan 35° och 60°C. För prover pastöriserade vid 70°C i 60 min var ingående värdet i blandslammet 4,33 ± 1,63 log₁₀ CFU/g våtvikt (n=8) och utgående värde efter behandling 4,73 ± 0,14 log₁₀ CFU/g våtvikt (n=6). Ett dubbelsidigt Student's T-test gav ett p-värde på 0,48. Detta tyder på att en viss reduktion av *C. perfringens* uppnås genom denna behandling.

Tabell 8. Medelvärden och standardavvikelser i log₁₀ CFU/g våtvikt för *C. perfringens*., n=2. Provtagningar där minst 1 av värdena är under detektionsgränsen är markerade i fet stil. HRT i dagar(d).

| Exponeringstid (h) | Obehandlat blandslam ^a | 35°C, 15 d HRT | 55°C, 7 d HRT | 55°C, 15 d HRT | 60°C, 7 d HRT | 60°C, 15 d HRT |
|--------------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| 24 | 4,20±0,84 | 4,57±0,22 | 2,92±2,72^b | 2,75±2,47^b | 3,71±0,57 | 2,49±2,11^b |
| 6 | 5,11±0,00 | 4,78±0,17 | 4,83±0,01 | 4,58±0,16 | 4,50±0,06 | 4,07±0,51 |
| 2,5 | 4,90±0,12 | 5,08±0,14 | 4,62±0,12 | 4,34±0,119 | 4,64±0,19 | 4,15±0,31 |
| 2 | 2,97±2,97^b | 4,68±0,27 | 4,66±0,09 | 4,35±0,27 | 4,60±0,04 | 4,27±0,02 |

^a 75% Primär, 25% Bioslam; ^b enbart 1 värde under detektionsgräns

REFERENSLITTERATUR

- Bagge, E. (2009). Hygiene Aspects of the Biogas process with Emphasis on Spore-Forming Bacteria Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU).
- EU (2010). Working Document Sludge And Biowaste. D.-G. ENVIRONMENT and D. C.-. Industry. Bryssel, Europeiska Kommissionen.
- Lang, N. L. and S. R. Smith (2008). "Time and temperature inactivation kinetics of enteric bacteria relevant to sewage sludge treatment processes for agricultural use." Water Research **42**(8-9): 2229-2241.
- Naturvårdsverket (2010). Bilaga 1: Förslag till förordning. Stockholm, Naturvårdsverket
- Vo Thi, Y.-p., J. Clemens, et al. (2009). "Hygienic effects and gas production of plastic bio-digesters under tropical conditions." Journal of Water and Health **7**(4): 590-596.

Appendix C.

Läkemedel. Analysmetod och resultat

Analysmetod

Chemicals

All pharmaceutical reference standards were classified as HPLC grade (> 98 %). Methanol (hypergrade for LC/MS) and acetonitrile (hypergrade for LC/MS) were purchased from Merck (Darmstadt, Germany). Formic acid (eluent additive for LC-MS > 98 %) and sulphuric acid were purchased from Sigma-Aldrich (Steinheim, Germany). The purified water was prepared by a Milli-Q Gradient ultra-pure water system (Millipore, Billerica, USA), equipped with a UV radiation source. $^2\text{H}_6$ -amitriptyline, $^2\text{H}_{10}$ -carbamazepine, $^{13}\text{C}_3$ ^{15}N -ciprofloxacin, $^2\text{H}_5$ -fluoxetine, $^{13}\text{C}_3$ -ibuprofen, $^{13}\text{C}_3$ $^2\text{H}_3$ -naproxen, $^{13}\text{C}_6$ -sulfamethoxazole, $^{13}\text{C}^2\text{H}_3$ -tramadol and $^{13}\text{C}_3$ -trimethoprim were bought from Cambridge Isotope Laboratories (Andover, MA, USA). $^2\text{H}_5$ -oxazepam, $^2\text{H}_4$ -risperidone $^{13}\text{C}_3$ ^{15}N and $^{13}\text{C}_2$ ^{15}N -tamoxifen were bought from Sigma-Aldrich (Steinheim, Germany).

Soil extraction

All sludge samples were first freeze dried and 0.1 g (dry weight) of the sludge samples were used for extraction. Fifty ng of each internal and surrogate standard were added to the sludge before extraction. Extraction was sequentially performed first using 1.5 ml ethylacetate and methanol (1:1 mixture) followed by 1.5 ml methanol and water (7:3 mixture) with 5 % triethylamine. Samples were homogenized for four minutes, at 42 000 oscillations per minute, using a Mini Beadbeater (Biospec. Bartlesville, USA) with zirconium beads and then centrifuged at 14 000 rounds per minute for 10 min. This protocol was done for both eluent mixtures and the supernatants were combined, evaporated to 20 ml and reconstituted in 1 ml water and acetonitrile (95:5 mixture) with 0.1 % formic acid.

Chemical analysis of pharmaceuticals

All pharmaceuticals were analyzed with the same methodology as reported in Grabic et al. (2012). In short, a triple stage quadrupole MS/MS TSQ Quantum Ultra EMR (Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA, USA) coupled with an Accela LC pump (Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA, USA) and a PAL HTC autosampler (CTC Analytics AG, Zwingen, Switzerland) were used as analytical system. Twenty μL of the sample was loaded onto a Hypersil GOLD aQ TM column (50 mm \cdot 2.1 mm ID \cdot 5 μm particles, Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA, USA) preceded by a guard column (2 mm \cdot 2.1 mm i.d, 5 μm particles) of the same packing material and from the same manufacturer. A gradient of flow and methanol and acetonitrile in water (all solvents buffered by 0.1 % formic acid) was used for elution of the pharmaceuticals. Elution conditions were programmed as follows: 200 $\mu\text{L min}^{-1}$ 10 % methanol in water for 1 min isocratically, then composition is changed to 30/10/60 water/ acetonitrile/methanol and flow of 250 $\mu\text{L min}^{-1}$ at 8 min. Then the column was washed by mixture ACN/methanol

60/40 and flow of 300 $\mu\text{l min}^{-1}$ in 9 minutes. These parameters were kept for 1 min and were then switched to starting conditions and the system was equilibrated for 4 min before next run.

Heated electrospray (HESI) and atmospheric pressure photo ionization (APPI) in positive and negative mode was used for ionisation of target compounds. Both first and third quadrupole were operated at resolution 0.7 FMWH, and two or three SRM transitions were monitored for each analyte. The setting of key parameters, SRM transitions, absolute recoveries, etc is stated in Grabic et al. (2011).

Samples were quantified using internal standard method. Several calibration standards covering all concentration range were measured before, in the middle and at the end of sample sequences. The maximum difference between results at quantification and qualification mass transition was set to 30% as criterion for positive identification.

Reference

Grabic R, Fick J, Lindberg RH, Fedorova G, Tysklind M. 2012. Multi-residue method for determination of trace levels of 100 pharmaceuticals in environmental samples using liquid chromatography coupled to triple quadrupole mass spectrometry. *Submitted manuscript*.

Resultat

Tabell C-1 Analyssvar för läkemedel vid 24 h exponeringstid vid försöksdag 111.

| Substans | LOQ (ng/g TS) | Orötat blandslam | | 35 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 7 dygns HRT | | 60 °C, 15 dygns HRT | | Pastörisering 70 °C, 60 min + upphettning | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------|--------------------|--------|---------------------|--------|--|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|
| | | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | | | |
| Alfuzosin | 0,1 | 23,8 | 19,4 | 21,6 | 24,1 | 37,0 | 30,6 | 31,7 | 5,1 | 18,4 | 31,0 | 6,0 | 18,0 | 18,3 | 3,6 | 1,0 | 2,3 | 22,0 | 17,2 | 21,5 | 20,2 |
| Alprazolam | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 14,8 | 24,8 | 19,8 | <LOQ | 19,9 | 15,8 | 17,9 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Amiodaron | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Amytriptylin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 6,1 | 6,1 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Atenolol | 5,0 | 21,0 | 65,1 | 43,0 | 20,9 | <LOQ | 20,9 | 49,1 | 8,7 | 28,9 | 126,9 | 82,7 | 150,0 | 119,9 | 61,1 | 104,2 | 82,6 | 29,6 | 24,4 | 30,5 | 28,2 |
| Atorvastatin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 90,9 | <LOQ | 90,9 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 81,7 | <LOQ | 81,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Atrakurium | 0,5 | <LOQ | 2,5 | 2,5 | <LOQ | 3,4 | 3,4 | <LOQ | 0,8 | 0,8 | 1,0 | <LOQ | <LOQ | 1,0 | 0,6 | <LOQ | 0,6 | 2,7 | <LOQ | <LOQ | 2,7 |
| Azelastin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 9,5 | <LOQ | 9,5 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Azitromycin | 5,0 | 10,5 | 9,1 | 9,8 | 7,6 | 10,2 | 8,9 | 21,7 | 14,0 | 17,9 | 11,2 | 6,2 | 17,1 | 11,5 | <LOQ | 5,5 | 5,5 | 10,5 | <LOQ | <LOQ | 10,5 |
| Beklometason | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Biperiden | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 0,4 | 5,5 | 0,1 | 2,8 | 36,7 | 18,5 | 27,6 | 4,5 | 14,6 | 10,7 | 10,0 | 5,3 | 1,3 | 3,3 | 11,9 | 2,7 | 2,0 | 5,6 |
| Bisoprolol | 0,1 | 1,9 | 0,7 | 1,3 | 1,6 | 3,7 | 2,6 | 17,5 | 11,8 | 14,7 | 7,2 | 7,7 | 11,6 | 8,8 | 9,9 | 5,1 | 7,5 | 2,5 | 2,4 | 4,9 | 3,3 |
| Bromokriptin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Budesonid | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Buprenorfin | 10,0 | 24,7 | 20,8 | 22,8 | 13,0 | 100,3 | 56,6 | 98,1 | 76,2 | 87,1 | 93,4 | 49,4 | 13,6 | 52,1 | <LOQ | 23,3 | 23,3 | 26,4 | 23,6 | <LOQ | 25,0 |
| Bupropion | 0,1 | 7,4 | 9,5 | 8,5 | 9,9 | 20,7 | 15,3 | 15,0 | 21,6 | 18,3 | 25,3 | 5,4 | 8,4 | 13,0 | 15,7 | 11,5 | 13,6 | 11,7 | 8,9 | 15,1 | 11,9 |
| Cilazapril | 1,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Ciprofloxacin | 10,0 | 1924,7 | 2820,8 | 2372,7 | 4426,6 | 5772,3 | 5099,4 | 3536,5 | 8454,7 | 5995,6 | 4562,3 | 901,7 | 2647,9 | 2704,0 | 1242,7 | 2383,3 | 1813,0 | 4904,4 | 1663,3 | 1729,0 | 2765,6 |
| Citaprolam | 5,0 | 151,5 | 143,6 | 147,6 | 235,3 | 211,0 | 223,1 | 288,3 | 207,3 | 247,8 | 155,0 | 266,1 | 197,1 | 206,1 | 311,1 | 277,5 | 294,3 | 131,3 | 77,2 | 106,7 | 105,1 |
| Cyproheptadin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 6,4 | <LOQ | <LOQ | 6,4 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Desloratidin | 0,5 | <LOQ | 1,1 | 1,1 | 2,7 | 16,9 | 9,8 | 39,1 | 24,3 | 31,7 | 2,3 | 32,7 | 15,6 | 16,9 | 9,6 | 2,3 | 6,0 | 2,8 | <LOQ | 50,9 | 26,8 |
| Diclofenak | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 10,0 | 10,0 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Dicycloverin | 5,0 | <LOQ | 5,2 | 5,2 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 5,3 | 5,3 | <LOQ | 10,4 | <LOQ | 10,4 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 7,1 | <LOQ | 12,9 | 10,0 |
| Difenhydramin | 0,1 | 5,4 | 3,5 | 4,4 | 9,3 | 12,3 | 10,8 | 15,1 | 12,8 | 13,9 | 11,8 | 22,4 | 18,5 | 17,6 | 24,2 | 15,0 | 19,6 | 8,4 | 2,1 | 5,9 | 5,5 |
| Dihydroergotamin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Diltiazem | 0,5 | <LOQ | 2,1 | 2,1 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 1,6 | 4,7 | 3,1 | <LOQ | <LOQ | 2,9 | 2,9 | <LOQ | 1,7 | 1,7 | 1,2 | <LOQ | 0,7 | 1,0 |
| Dipyridamol | 50,0 | 168,8 | 222,5 | 195,7 | 245,6 | 398,2 | 321,9 | 580,6 | 647,3 | 613,9 | 271,5 | 485,5 | 365,5 | 374,2 | 754,0 | 262,7 | 508,4 | 185,2 | 111,9 | 250,5 | 182,5 |
| Duloxetin | 1,0 | <LOQ | 6,4 | 6,4 | <LOQ | 7,5 | 7,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | 1,5 | 1,5 |
| Eprosartan | 5,0 | 10,5 | 21,1 | 15,8 | 7,2 | 6,6 | 6,9 | 11,2 | 5,1 | 8,2 | <LOQ | 22,7 | 20,3 | 21,5 | 8,7 | 12,6 | 10,7 | <LOQ | 30,0 | 11,0 | 20,5 |
| Etiny/lestradiol | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Etonogestrel | 0,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Ezetimib | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Fentanyl | 0,5 | 2,0 | <LOQ | 2,0 | 3,3 | 1,6 | 2,4 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | <LOQ | 1,1 | <LOQ | 1,1 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 1,6 | 1,1 | 0,9 | 1,2 |
| Finasterid | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Flekainide | 0,1 | 9,8 | 1,8 | 5,8 | 14,0 | 10,4 | 12,2 | 15,6 | 5,8 | 10,7 | 11,5 | 14,2 | 12,8 | 12,9 | 26,8 | 20,9 | 23,8 | 2,8 | 0,3 | 4,8 | 2,7 |
| Flufenazin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Flukonazol | 0,5 | 11,1 | 0,5 | 5,8 | <LOQ | 0,9 | 0,9 | 9,5 | 41,7 | 25,6 | 1,3 | 3,3 | 28,2 | 10,9 | 1,1 | 20,6 | 10,9 | <LOQ | 0,7 | 5,6 | 3,2 |
| Flunitrazepam | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |

| Substans | LOQ (ng/g TS) | Orötat blandslam | | 35 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 7 dygns HRT | | 60 °C, 15 dygns HRT | | Pastörisering 70 °C, 60 min + upphettning | | | | | | |
|--------------------|------------------|------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|---------|--------------------|-------|---------------------|-------|--|-------|---------|-------|-------|---------|---------|
| | | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | | | | | | |
| Alfuzosin | 0,1 | 23,8 | 19,4 | 21,6 | 24,1 | 37,0 | 30,6 | 31,7 | 5,1 | 18,4 | 31,0 | 6,0 | 18,0 | 18,3 | 22,0 | 17,2 | 21,5 | 20,2 |
| Fluoxetin | 5,0 | 19,4 | 33,1 | 26,2 | 48,3 | 114,1 | 81,2 | 19,0 | 49,2 | 34,1 | 160,1 | 32,4 | 2,0 | 64,8 | 174,7 | 13,6 | 94,2 | 16,0 |
| Flupentixol | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 9,9 | <LOQ | 9,9 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Flutamid | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Gilbenklamide | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Glimepirid | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Haloperidol | 0,1 | 0,2 | <LOQ | 0,2 | 0,2 | <LOQ | 0,2 | 5,3 | 6,4 | 5,9 | 0,3 | 0,7 | <LOQ | 0,5 | <LOQ | 0,5 | 0,2 | 0,4 |
| Hydroxyzin | 0,5 | 36,3 | 22,1 | 29,2 | 48,0 | 67,5 | 57,8 | 177,1 | 28,4 | 102,7 | 61,0 | 79,9 | 54,0 | 65,0 | 70,8 | 35,7 | 53,2 | 7,2 |
| Ibuprofen | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Irbesartan | 0,5 | 157,9 | 436,1 | 297,0 | 437,9 | 162,4 | 300,2 | 111,7 | 91,9 | 101,8 | 32,3 | 48,3 | 44,5 | 41,7 | <LOQ | 4,6 | 4,6 | 196,9 |
| Karbamazepin | 1,0 | 35,2 | 17,9 | 26,6 | 61,1 | 47,0 | 54,1 | 69,0 | 49,8 | 59,4 | 68,9 | 77,7 | 55,5 | 67,4 | 42,3 | 48,3 | 45,3 | 15,5 |
| Ketokonazol | 50,0 | 286,5 | 433,8 | 360,2 | 428,8 | 227,3 | 328,1 | 666,8 | 439,3 | 553,1 | 624,7 | 264,9 | 470,3 | 453,3 | 303,0 | <LOQ | 303,0 | <LOQ |
| Ketoprofen | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Klartromycin | 1,0 | 21,4 | 29,7 | 25,5 | 18,2 | <LOQ | 18,2 | 111,1 | 24,2 | 67,6 | 113,1 | 29,4 | 78,4 | 73,6 | 84,0 | 36,5 | 60,3 | 20,7 |
| Klemastin | 0,5 | 1,9 | <LOQ | 1,9 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 0,8 | 0,8 | 1,3 | 0,5 | <LOQ | 0,9 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Klindamycin | 1,0 | 2,5 | <LOQ | 2,5 | 4,0 | 7,1 | 5,5 | 3,7 | 5,3 | 4,5 | 3,2 | 2,1 | <LOQ | 2,6 | 6,2 | 1,6 | 3,9 | 9,0 |
| Klomipramin | 0,5 | 26,1 | 38,4 | 32,3 | 87,0 | 37,8 | 62,4 | 16,1 | 52,7 | 34,4 | 39,4 | 102,6 | 28,2 | 56,8 | 66,9 | 18,7 | 42,8 | 20,3 |
| Klonazepam | 5,0 | <LOQ | 6,3 | 6,3 | 10,5 | 8,7 | 9,6 | 17,7 | 31,6 | 24,7 | 9,3 | 12,7 | 8,9 | 10,3 | <LOQ | 7,1 | 7,1 | <LOQ |
| Klorpromazin | 10,0 | 21,2 | <LOQ | 21,2 | 13,6 | 35,1 | 24,4 | <LOQ | 31,7 | 31,7 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 22,7 |
| Klorprotixen | 5,0 | 6,9 | <LOQ | 6,9 | <LOQ | 5,9 | 5,9 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 8,4 |
| Klotrimazol | 1,0 | 152,6 | 122,8 | 137,7 | 124,2 | 116,9 | 120,5 | 170,5 | 60,6 | 115,5 | 32,6 | 86,3 | 20,8 | 46,6 | 14,1 | 11,2 | 12,7 | 178,4 |
| Kodein | 0,5 | 105,6 | 77,9 | 91,7 | 3,3 | 10,5 | 6,9 | 143,8 | 152,2 | 148,0 | 23,8 | 12,1 | 137,6 | 57,8 | 9,1 | 149,7 | 79,4 | 2,4 |
| Levonorgestrel | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Loperamid | 0,5 | 3,2 | 5,3 | 4,3 | 7,7 | 9,9 | 8,8 | 35,0 | 28,9 | 31,9 | 7,6 | 4,3 | 6,8 | 6,2 | 1,3 | 1,7 | 1,5 | 7,0 |
| Maprotilin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Medroxiprogesteron | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Megestrol | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Meklozin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 5,1 | 5,1 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Memantin | 0,5 | 1,4 | 2,5 | 1,9 | 4,4 | 1,7 | 3,1 | 2,1 | 5,0 | 3,5 | 1,6 | 3,9 | 7,1 | 4,2 | 4,1 | 2,2 | 3,1 | 5,2 |
| Metoprolol | 5,0 | 35,0 | 29,5 | 32,3 | 403,3 | 245,1 | 324,2 | 228,0 | 493,1 | 360,6 | 344,0 | 468,5 | 230,9 | 347,8 | 354,5 | 247,8 | 301,2 | 174,6 |
| Mianserin | 1,0 | 6,6 | <LOQ | 6,6 | <LOQ | 4,2 | 4,2 | 9,4 | 11,3 | 10,4 | <LOQ | 6,4 | <LOQ | 6,4 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Mikonazol | 5,0 | 25,9 | 20,2 | 23,0 | 15,5 | 19,0 | 17,2 | 24,9 | 55,0 | 39,9 | 10,3 | 18,7 | <LOQ | 14,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 13,3 |
| Mirtazapin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 20,7 | <LOQ | 20,7 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Naloxon | 1,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 97,7 | 97,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 104,3 | <LOQ | 104,3 | <LOQ | 32,9 | 32,9 | <LOQ |
| Naproxen | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Nefazodon | 0,5 | 2,5 | <LOQ | 2,5 | 4,4 | <LOQ | 4,4 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Ofloxacin | 10,0 | 110,8 | 158,8 | 134,8 | 130,4 | 235,5 | 182,9 | 92,1 | 182,6 | 137,4 | 59,1 | 15,7 | 53,6 | 42,8 | 77,6 | 115,0 | 96,3 | 65,1 |
| Orfenadrin | 0,1 | 8,4 | 12,5 | 10,5 | 7,4 | 20,1 | 13,7 | 27,9 | 43,0 | 35,5 | 20,2 | 86,7 | 24,8 | 43,9 | 56,8 | 43,5 | 50,1 | 2,5 |
| Oxazepam | 5,0 | 18,7 | 34,1 | 26,4 | 30,3 | 35,7 | 33,0 | 9,3 | 71,3 | 40,3 | 29,8 | 21,7 | 10,2 | 20,6 | <LOQ | 7,3 | 7,3 | 23,1 |
| Oxytetracyklin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |
| Paracetamol | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ |

Tabell C-2 Analyssvar för läkemedel vid 24 h exponeringstid vid försöksdag 133.

| Substans | LOQ (ng/g TS) | Örötat blandslam | | 35 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 7 dygns HRT | | 60 °C, 15 dygns HRT | | Pastörisering 70 °C, 60 min + upphettning | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------|--------------------|--------|---------------------|--------|--|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|
| | | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | | | | | | | | |
| Alfuzosin | 0,1 | 31,6 | 24,9 | 28,2 | 22,7 | 49,9 | 36,3 | 25,8 | 32,0 | 28,9 | 2,9 | 16,5 | 15,8 | 11,7 | 7,8 | 5,6 | 6,7 | 30,5 | 25,2 | 20,8 | 25,5 |
| Alprazolam | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 17,4 | 17,4 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Amiodaron | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Amytriptylin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 17,4 | <LOQ | 17,4 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 35,3 | <LOQ | 35,3 |
| Atenolol | 5,0 | 68,3 | 61,8 | 65,1 | 26,2 | 41,5 | 33,8 | 11,4 | 94,8 | 53,1 | 24,6 | 50,9 | 72,3 | 49,3 | 153,3 | 51,0 | 102,1 | 108,5 | 91,1 | 124,0 | 107,9 |
| Atorvastatin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Atrakurium | 0,5 | <LOQ | 0,7 | 0,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 5,8 | 5,8 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Azelastin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 6,7 | 6,7 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Azitromycin | 5,0 | 42,3 | 9,9 | 26,1 | 10,6 | 26,8 | 18,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 23,8 | <LOQ | 9,3 | 16,6 | 5,7 | 20,0 | 12,8 | <LOQ | 9,4 | 8,6 | 9,0 |
| Beklometason | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 38,1 | <LOQ | 38,1 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Biperiden | 0,1 | 1,9 | 7,7 | 4,8 | 0,4 | 6,5 | 3,4 | 15,8 | 4,1 | 9,9 | 16,9 | 0,4 | 1,0 | 6,1 | 3,6 | 2,8 | 3,2 | 0,8 | 2,8 | 4,9 | 2,9 |
| Bisoprolol | 0,1 | 4,6 | 1,1 | 2,8 | 1,5 | 2,2 | 1,8 | 4,4 | 5,3 | 4,8 | 2,0 | 1,4 | 5,3 | 2,9 | 3,1 | 3,0 | 3,1 | 1,0 | 3,1 | 2,1 | 2,1 |
| Bromokriptin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 5,3 | 5,3 | <LOQ | 5,4 | <LOQ | 5,4 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Budesonid | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Buprenorfin | 10,0 | 65,9 | 14,1 | 40,0 | <LOQ | 17,1 | 17,1 | 79,9 | 58,4 | 69,2 | <LOQ | 18,9 | 23,6 | 21,3 | 18,6 | <LOQ | 18,6 | 12,5 | <LOQ | 14,8 | 13,7 |
| Bupropion | 0,1 | 4,5 | 6,3 | 5,4 | 8,6 | 17,5 | 13,1 | 58,3 | 44,9 | 51,6 | 10,2 | 8,4 | 36,0 | 18,2 | 11,4 | 15,5 | 13,4 | 3,5 | 3,0 | 7,6 | 4,7 |
| Cilazapril | 1,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Ciprofloxacin | 10,0 | 2672,5 | 1525,9 | 2099,2 | 4505,6 | 3700,3 | 4102,9 | 1467,2 | 1517,2 | 1492,2 | 1028,7 | 4356,4 | 3848,7 | 3078,0 | 1036,2 | 1736,4 | 1386,3 | 2605,6 | 2886,8 | 1799,0 | 2430,5 |
| Citaprolam | 5,0 | 201,7 | 59,4 | 130,5 | 161,3 | 193,7 | 177,5 | 386,4 | 158,9 | 272,6 | 247,2 | 139,7 | 141,6 | 176,2 | 174,4 | 285,6 | 230,0 | 105,5 | 125,8 | 87,5 | 106,3 |
| Cyproheptadin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Desloratadin | 0,5 | 1,9 | <LOQ | 1,9 | 1,6 | 8,6 | 5,1 | 17,9 | 36,3 | 27,1 | 2,1 | 5,5 | 0,8 | 2,8 | 10,0 | 0,9 | 5,4 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Diclofenak | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Dicycloverin | 5,0 | 8,9 | <LOQ | 8,9 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Difenhydramin | 0,1 | 7,6 | 3,1 | 5,4 | 8,2 | 12,7 | 10,4 | 8,3 | 2,7 | 5,5 | 10,6 | 3,7 | 10,5 | 8,3 | 12,1 | 12,9 | 12,5 | 5,8 | 5,8 | 4,2 | 5,2 |
| Dihydroergotamin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Diltiazem | 0,5 | 5,4 | 0,9 | 3,2 | <LOQ | 1,0 | 1,0 | 3,3 | <LOQ | 3,3 | <LOQ | 0,6 | 0,7 | 0,6 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 0,5 | 3,0 | 1,3 | 1,6 |
| Dipyridamol | 50,0 | 280,3 | 93,4 | 186,9 | 464,4 | 506,9 | 485,6 | 659,9 | 272,7 | 466,3 | 504,1 | 181,6 | 256,5 | 314,0 | 311,6 | 323,7 | 317,7 | 206,4 | 194,7 | 156,8 | 186,0 |
| Duloxetine | 1,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Eprosartan | 5,0 | 16,2 | 18,1 | 17,1 | 24,9 | 7,8 | 16,4 | <LOQ | 31,7 | 31,7 | <LOQ | 18,7 | 22,3 | 20,5 | 9,3 | 6,1 | 7,7 | 9,7 | 18,8 | 8,3 | 12,3 |
| Etinylestradiol | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Etonogestrel | 0,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Ezetimib | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Fentanyl | 0,5 | <LOQ | 1,5 | 1,5 | 3,4 | 3,0 | 3,2 | 2,0 | 1,5 | 1,7 | 7,8 | 0,5 | <LOQ | 4,2 | <LOQ | 2,9 | 2,9 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Finasterid | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Flekainide | 0,1 | 4,7 | 3,1 | 3,9 | 8,7 | 10,3 | 9,5 | 10,9 | 11,9 | 11,4 | 8,8 | 4,4 | 8,1 | 7,1 | 11,8 | 12,1 | 11,9 | 4,0 | 2,6 | 1,9 | 2,8 |
| Flufenazin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Flukonazol | 0,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 0,5 | 1,0 | 0,8 | 6,5 | 4,2 | 5,3 | 17,0 | 2,6 | 2,4 | 7,3 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | 1,0 |
| Flunitrazepam | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |

| Substans | LOQ (ng/g TS) | Orötat blandslam | | 35 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 7 dygns HRT | | 60 °C, 15 dygns HRT | | Pastörisering 70 °C, 60 min + upphettning | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|------------------|--------|---------------------|-------|---------------------|---------|--------------------|-------|---------------------|-------|--|-------|---------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|---------|
| | | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | | | | | | | | |
| Fluoxetin | 5,0 | 34,9 | 10,6 | 22,8 | 25,8 | 19,1 | 22,5 | 24,9 | 1,6 | 13,2 | 21,3 | 168,6 | 12,8 | 67,6 | 51,8 | 36,9 | 44,3 | 44,8 | <LOQ | 16,1 | 30,5 |
| Flupentixol | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 5,5 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Flutamid | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Glibenklamide | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Glimepirid | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Haloperidol | 0,1 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | <LOQ | 0,3 | 10,0 | 9,7 | 9,9 | 1,1 | 1,6 | 0,3 | 1,0 | 0,9 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| Hydroxyzin | 0,5 | 13,8 | 78,6 | 46,2 | 48,1 | 35,9 | 42,0 | 24,2 | 78,0 | 51,1 | 70,2 | 74,6 | 53,7 | 66,2 | 34,8 | 69,9 | 52,4 | 11,8 | 34,5 | 20,1 | 22,1 |
| Ibuprofen | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Ibexartan | 0,5 | 119,6 | 3736,9 | 1928,2 | 806,3 | 265,5 | 535,9 | 35,5 | 4,3 | 19,9 | 54,5 | 61,9 | 66,1 | 60,8 | 62,0 | 50,7 | 56,4 | 170,5 | 188,6 | 347,7 | 235,6 |
| Karbamazepin | 1,0 | 30,9 | 55,1 | 43,0 | 26,8 | 70,3 | 48,6 | 47,2 | 49,4 | 48,3 | 41,9 | 29,5 | 76,5 | 49,3 | 46,1 | 60,0 | 53,1 | 51,8 | 52,0 | 54,6 | 52,8 |
| Ketokonazol | 50,0 | 153,1 | 242,3 | 197,7 | 122,5 | 195,9 | 159,2 | 286,9 | 158,2 | 222,5 | 508,7 | 130,8 | 351,9 | 330,5 | 91,4 | 85,7 | 88,5 | <LOQ | <LOQ | 113,2 | 113,2 |
| Ketoprofen | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Klaritromycin | 1,0 | 5,5 | 250,5 | 128,0 | 15,2 | 11,3 | 13,2 | 16,7 | 45,8 | 31,3 | 477,6 | 68,8 | 181,7 | 242,7 | 60,8 | 112,5 | 86,6 | 16,5 | 12,9 | 17,3 | 15,6 |
| Klemastin | 0,5 | 0,8 | <LOQ | 0,8 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 0,8 | 4,7 | 2,7 | <LOQ | 0,6 | <LOQ | 0,6 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Klindamycin | 1,0 | 3,3 | 4,2 | 3,7 | 12,8 | 4,6 | 8,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 3,4 | 3,7 | 4,3 | 3,8 | 2,3 | 1,5 | 1,9 | 2,0 | 5,0 | 1,2 | 2,7 |
| Klomipramin | 0,5 | 34,7 | 47,7 | 41,2 | 11,0 | 24,9 | 17,9 | 26,3 | 52,0 | 39,2 | 51,6 | 77,8 | 15,6 | 48,3 | 11,3 | 14,1 | 12,7 | 32,6 | 11,8 | 31,0 | 25,2 |
| Klonazepam | 5,0 | 14,2 | <LOQ | 14,2 | 30,7 | 19,2 | 25,0 | 34,2 | 6,9 | 20,6 | <LOQ | 9,0 | <LOQ | 9,0 | 7,1 | 12,3 | 9,7 | 8,6 | <LOQ | 7,4 | 8,0 |
| Klorpromazin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 10,5 | 51,1 | 30,8 | <LOQ | 37,5 | 37,5 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | 40,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 13,6 | <LOQ | 13,6 |
| Klorprotixen | 5,0 | <LOQ | 39,2 | 39,2 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 20,1 | 20,1 | 9,1 | <LOQ | 6,3 | 7,7 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 18,8 | <LOQ | 18,8 |
| Klotrimazol | 1,0 | 75,4 | 16,7 | 46,0 | 307,0 | 158,8 | 232,9 | 104,8 | 98,0 | 101,4 | 122,5 | 94,8 | 26,1 | 81,1 | 11,7 | 1123,1 | 567,4 | 79,6 | 82,7 | 88,3 | 83,5 |
| Kodein | 0,5 | 90,5 | 72,1 | 81,3 | 12,4 | <LOQ | 12,4 | 43,6 | 12,0 | 27,8 | 23,7 | 60,0 | 20,4 | 34,7 | 260,0 | 63,8 | 161,9 | 55,0 | 49,6 | 12,0 | 38,9 |
| Levonorgestrel | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Loperamid | 0,5 | 3,5 | 13,0 | 8,2 | 2,6 | 5,7 | 4,2 | 9,7 | 12,1 | 10,9 | <LOQ | 8,5 | <LOQ | 8,5 | 1,7 | 2,6 | 2,2 | 8,9 | 6,1 | 4,0 | 6,3 |
| Maprotilin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Medroxiprogesteron | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Megestrol | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Meklozin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Memantin | 0,5 | 4,5 | 2,1 | 3,3 | 2,4 | 4,7 | 3,5 | 6,7 | 9,3 | 8,0 | 4,6 | 2,8 | 6,7 | 4,7 | 3,1 | 2,3 | 2,7 | 1,3 | 0,6 | 1,9 | 1,3 |
| Metoprolol | 5,0 | 202,6 | 84,5 | 143,5 | 372,5 | 223,4 | 297,9 | 331,6 | 417,0 | 374,3 | 202,6 | 213,1 | 290,6 | 235,4 | 251,4 | 455,3 | 353,3 | 212,3 | 238,6 | 227,6 | 226,2 |
| Mianserin | 1,0 | 4,9 | <LOQ | 4,9 | <LOQ | 1,2 | 1,2 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 10,1 | 8,4 | 9,2 | <LOQ | 4,4 | 4,4 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Mikonazol | 5,0 | 35,7 | <LOQ | 35,7 | 9,9 | 27,6 | 18,7 | 70,3 | 30,4 | 50,3 | <LOQ | 20,5 | <LOQ | 20,5 | <LOQ | 9,7 | 9,7 | 13,7 | 10,2 | 7,2 | 10,4 |
| Mirtazapin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 37,4 | 37,4 | <LOQ | 24,9 | 20,7 | 22,8 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Naloxon | 1,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | 31,1 | 31,1 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Naproxen | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Nefazodon | 0,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Ofloxacin | 10,0 | 97,0 | 28,6 | 62,8 | 196,7 | 144,6 | 170,7 | 18,5 | 26,7 | 22,6 | 155,3 | 155,1 | 126,5 | 145,6 | 52,4 | 34,9 | 43,7 | 128,2 | 106,8 | 47,6 | 94,2 |
| Orfenadrin | 0,1 | 6,3 | 30,4 | 18,3 | 21,1 | 18,3 | 19,7 | 10,4 | 67,3 | 38,9 | 173,2 | 8,4 | 17,3 | 66,3 | 18,8 | 62,0 | 40,4 | 7,6 | 11,8 | 0,6 | 6,7 |
| Oxazepam | 5,0 | 57,8 | 9,7 | 33,7 | 32,6 | 53,8 | 43,2 | 21,9 | 10,0 | 16,0 | <LOQ | 18,8 | 9,4 | 14,1 | 9,7 | 15,1 | 12,4 | 20,8 | 27,4 | 26,6 | 24,9 |
| Oxytetracyklin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |
| Paracetamol | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! |

| Substans | LOQ (ng/g TS) | Orötat blandslam | | 35 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 15 dygns HRT | | 55 °C, 7 dygns HRT | | 60 °C, 15 dygns HRT | | Pastörisering 70 °C, 60 min + upphetning | |
|----------------|------------------|------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|---------|--------------------|---------|---------------------|-------|---|-------|
| | | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel | Medel |
| Paroxetin | 10,0 | <LOQ | 12,0 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | 91,0 | <LOQ | 49,7 | <LOQ | 69,0 | 11,6 | 20,7 |
| Perfenazin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Pizotifen | 0,5 | 2,1 | 16,4 | 9,3 | 0,5 | 4,1 | 2,3 | 1,1 | 4,4 | 4,9 | 18,9 | 9,4 | 2,3 |
| Progesteron | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Prometazin | 10,0 | 18,3 | 82,2 | 50,3 | 47,7 | 21,0 | 34,3 | <LOQ | 37,9 | 13,1 | 15,1 | 14,1 | 17,8 |
| Ranitidin | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Repaglinid | 0,5 | <LOQ | 1,7 | 1,7 | 0,7 | <LOQ | 0,7 | 13,1 | 3,6 | 8,4 | <LOQ | 16,1 | 16,1 |
| Risperidon | 0,1 | 0,6 | 1,0 | 0,8 | 1,8 | 0,1 | 1,0 | 1,1 | 4,8 | 2,9 | 2,5 | 5,1 | 2,0 |
| Rosuvastatin | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Roxitromycin | 50,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Sertralín | 10,0 | 269,8 | 286,4 | 278,1 | 643,3 | 700,6 | 671,9 | 636,6 | 983,0 | 809,8 | 192,1 | 554,8 | 188,2 |
| Sotalol | 0,5 | 64,0 | 96,0 | 80,0 | 76,5 | 117,0 | 96,8 | 313,7 | 135,7 | 224,7 | 159,3 | 228,4 | 245,9 |
| Sulfametoxazol | 5,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Tamoxifen | 5,0 | 10,4 | 30,3 | 20,3 | 9,3 | 5,6 | 7,4 | 7,7 | <LOQ | 7,7 | <LOQ | 15,8 | 31,3 |
| Telmisartan | 50,0 | <LOQ | 149,2 | 149,2 | 132,7 | 160,4 | 146,6 | 167,6 | 292,7 | 230,2 | 51,7 | 84,0 | <LOQ |
| Terbutalin | 0,5 | 0,8 | 1,3 | 1,1 | 1,5 | 3,4 | 2,4 | 4,1 | 53,8 | 28,9 | 3,2 | 25,5 | 30,8 |
| Tramadol | 50,0 | 83,5 | 60,5 | 72,0 | 64,8 | 75,4 | 70,1 | 101,9 | 101,6 | 101,7 | 83,6 | 84,7 | 102,2 |
| Trimetoprim | 0,1 | 33,5 | 4,1 | 18,8 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,7 |
| Venlafaxin | 0,5 | 67,9 | 54,5 | 61,2 | 139,2 | 178,5 | 158,8 | 264,8 | 104,3 | 184,6 | 112,0 | 67,3 | 107,5 |
| Verapamil | 10,0 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ | <LOQ |
| Zolpidem | 0,5 | <LOQ | <LOQ | #DIV/0! | 1,9 | 3,5 | 2,7 | 1,8 | <LOQ | 1,8 | 5,7 | 3,5 | 3,0 |

Appendix D.

PAH, PCB och groningshämning.

Metod och resultat.

Avrapportering av resultat till projektet "Rötning av slam vid 35, 55 och 60 °C – utvärdering av hygieniseringseffekt, biogasproduktion samt reduktion av läkemedel och andra industrikemikalier"

Eva Eriksson och Mikael Olsson, Institut for Vand og Miljøteknologi (DTU Miljø), Danmarks Tekniske Universitet, DK-2800 Kongens Lyngby, Danmark.

Efter överenskommelse med Åsa och Hamse 27:e juni 2012 beskriver vi Material och Metoder, Resultat och Slutsatser.

1 Material och metoder

1.1 Provhantering och homogenisering

Proverna mottogs frysta i 1 liters PE flaskor och bevarades i frys vid -18 °C fram till upptining. Upptining föregick i kylskåp vid +4 °C och när proverna var tinade uttogs delprover för analys. En propelleromrörare (1 000 rpm i 10 min) användes för att homogenisera proverna, och delprover uttogs under pågående omrörning. Fyra delprov om 50 ml uttogs från varje prov.

1.2 Torkning och frystorkning

Delprover för PAH (polycykliska aromatiska kolväten) och PCB (polyklorerade bifenyler) analys frystorkades i samarbete med DTU VET (Veterinærinstituttet). Den rådande kapaciteten faciliterade att 8 prover á 50 ml frystorkades på ca. 48 h och det frystorkade materialet bevarades vid +4 °C fram till analys. Även resuspenderat certifierat referensmaterial frystorkades (LGC6182 och LGC6184, LGCstandards).

Delprover för groningshämning torkades i ugn vid 60 °C i ca. 68 h (fredag lunch till måndag fm.) och mortlades innan analys.

1.3 Torrsubstans, glödrest och metaller

Serierna A, C, E, I G och K uttogs för analys, men 6I kunde inte återfinnas, så 6J analyserades istället.

Torrsubstans (TS) och glödrest (GR) bestämdes enligt DS/EN 872:1997 vid filtrering med ett 1,2 µm glasfiberfilter och efterföljande torkning vid 105 °C och glödgning samt glödförlust (GF) vid 550 °C.

Metaller mättes i filterresidualen efter torkning vid 105 °C med hjälp av syraextraktion med salpetersyra (US EPA 3050). Analyserna är båda standardmetoder vid DTU Miljø, så ingen projektrelaterad utveckling har utförts.

1.4 Extraktion

PAH

15 PAH-er från US EPAs lista av 16 prioriterade PAH-er inkluderades (naphthalenen, acenaphthene, acenaphthylene, fluorene, phenantrene, anthracene, fluoroanthene, pyrene, chrysene, benzo[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, benzo[a]pyrene, indeno[1,2,3-cd]perylene, benzo[ghi]perylene, dibenzo[a,h]anthracene) från provserierna B, F, J, och L.

Ca 0,5 g frystorkat och finfördelat slam extraherades med hexan: aceton (6:4) mha Microwave Assisted Extraction (MAE) (Multiwave 3000SOLV, Anton-Paar), varefter extrakten filtrerades genom glasull. Extrakten tillsattes 2 ml isooktan (2,2,4-trimetylpentan) innehållande 100 µg/l naftalened8, pyrene-d10 och phenantrene-d10 som internstandarder och indunstades med hjälp av nitrogen eller tryckluft ned till 2 ml. Extraktionsproven överfördes till konditionerade fastfas (SPE) kolonner (LC-Florisil) och analyterna eluerades med en hexan: toluen (4:1) blandning. SPE-extrakten indunstades till 2 ml, och överfördes till GC-MS-vialer. Analyterna separerades och detekterades med hjälp av gaskromatografi-masspektrometri (GC-MS). Proverna extraherades och analyserades serievis och samtliga PAH-er analyserades samtidigt i varje prov.

PCB

De 7 prioriterade PCB-erna från EUs lista inkluderades (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, och 180) och serierna B, F, J, och L uttogs för analys.

Ca 0,5 g frystorkat och finfördelat slam extraherades med hexan mha MAE (Multiwave 3000SOLV, Anton-Paar), varefter extrakten filtrerades genom glasull. Extrakten tillsattes 2 ml isooktan (2,2,4-trimetylpentan) innehållande 10 µg/l 1,2,3,4-tetraklornaftalen som internstandard och indunstades med hjälp av nitrogen eller tryckluft ned till 2 ml. Extraktionsproven överfördes till konditionerade fastfas (SPE) kolonner (LC-Florisil) och analyterna eluerades med hexan. SPE-extrakten indunstades till 2 ml, och överfördes till GC-MS-vialer. Analyterna separerades och detekterades med hjälp av GC-MS. Proverna extraherades och analyserades serievis och samtliga PCB-er analyserades samtidigt i varje prov.

1.5 Mätområde

Metoden kalibrerades till ett mätområde som motsvarar ungefär 0,1–8 mg/kg TS för varje PAH och ungefär 4–82 µg/kg TS för varje PCB (Tabell 1 och 2). Kalibreringsstandarderna har behandlats exakt som proverna och varit igenom hela metoden. Åtta olika koncentrationer och triplikat av varje koncentration användes för att konstruera kalibreringskurvorna och det 95-procentiga konfidensintervallet från kalibreringskurvorna användes för att bestämma konfidensintervallet för de mätta proverna. För PAH beräknades koncentrationen från genomsnittet av fyra analyser och från PCB från två analyser. Ordinary-least square regression med internstandard korrigering och med $R^2 > 0,99$ användes i samtliga fall.

1.6 Kvantifikationsgränser

Kvantifikationsgränser bestämdes, enligt Winslow et al 2006, från kalibreringskurvornas 99-procentigt prediktionsintervall tillsammans med 7 replikater av en låg kalibreringsstandard.

1.7 Extraktionsutbyte

Certifierat slam innehållande samtliga 15 PAH-er eller 7 PCB-er (LGC6182 och LGC6184, LGCstandards) användes för bestämning av extraktionsutbytet. Genomsnittet av fyra individuella extraktioner jämfördes med den i referensmaterialets angivna koncentration.

Tabell 1 PAH; mätområde, uppmätta och angivna koncentrationer av certifierat slam

| Ämne | Mätområde mg/kg TS | Kvantifikations- gräns mg/kg TS | Uppmätt konc. cert slam mg/kg TS (95% ki) | Angiven konc. cert slam mg/kg TS (95% ki) |
|--|-----------------------|------------------------------------|--|---|
| Naphthalene | 0.2 - 8 | 0.2* | 0.35 ^{0.38} _{0.31} | 0.33±0.16 |
| Acenaphthene | 0.1 - 8 | 0.1 | 0.04* | 0.10±0.04 |
| Acenaphthylene | 0.1 - 8 | 0.1 | 0.06 ^{0.10} _{0.02} | 0.2 |
| Fluorene | 0.1 - 8 | 0.10 | 0.09 ^{0.13} _{0.06} | 0.19±0.10 |
| Phenanthrene | 0.1 - 8 | 0.11 | 0.80 ^{0.84} _{0.77} | 1.04±0.29 |
| Anthracene | 0.2 - 8 | 0.20 | 1.04±0.29 | 0.17±0.07 |
| Fluoranthene | 0.1 - 8 | 0.10 | 1.50 ^{1.53} _{1.46} | 1.81±0.48 |
| Pyrene | 0.1 - 8 | 0.10 | 1.33 ^{1.35} _{1.30} | 1.53±0.50 |
| Chrysene | 0.4 - 8 | 0.1* | 0.58 ^{0.66} _{0.50} | 0.84±0.19 |
| Benzo[a]anthracene | 0.2 - 8 | 0.20 | 0.63 ^{0.69} _{0.56} | 0.66±0.25 |
| Benzo[b]fluoranthene | 0.4 - 8 | 0.1* | 0.99 ^{1.10} _{0.88} | 0.59±0.18 |
| Benzo[a]pyrene | 0.4 - 8 | 0.4 | 0.55 ^{0.69} _{0.40} | 0.95±0.28 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyrene + Dibenzo[a,h]anthracene | 0.4 - 8 | 0.40 | 0.38 ^{0.67} _{0.07} | 0.58±0.21 |
| Benzo[ghi]perylene | 0.4 - 8 | 0.39 | 0.44 ^{0.68} _{0.17} | 0.62±0.33 |

*Endast indikativt värde då koncentrationen faller utanför mätområdet

Tabell 2 PCB; mätområde, uppmätta och angivna koncentrationer av certifierat slam

| | Mätområde µg/kg TS | Kvantifikations- gräns µg/kg TS | Uppmätt konc. cert slam µg/kg TS (95% ki) | Angiven konc. cert slam µg/kg TS (95% ki) |
|---------|-----------------------|------------------------------------|--|---|
| PCB 28 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 29.0 ^{29.7} _{28.3} | 28±8 |
| PCB 52 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 22.8 ^{23.8} _{21.8} | 14±4 |
| PCB 101 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 31.5 ^{32.4} _{30.6} | 37±3 |
| PCB 118 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 16.8 ^{17.7} _{15.9} | 17±2 |
| PCB 138 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 55.9 ^{57.3} _{54.9} | 77±7 |
| PCB 153 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 102* | 112±8 |
| PCB 180 | 4.2 – 82.6 | 4.2 | 84* | 78±10 |

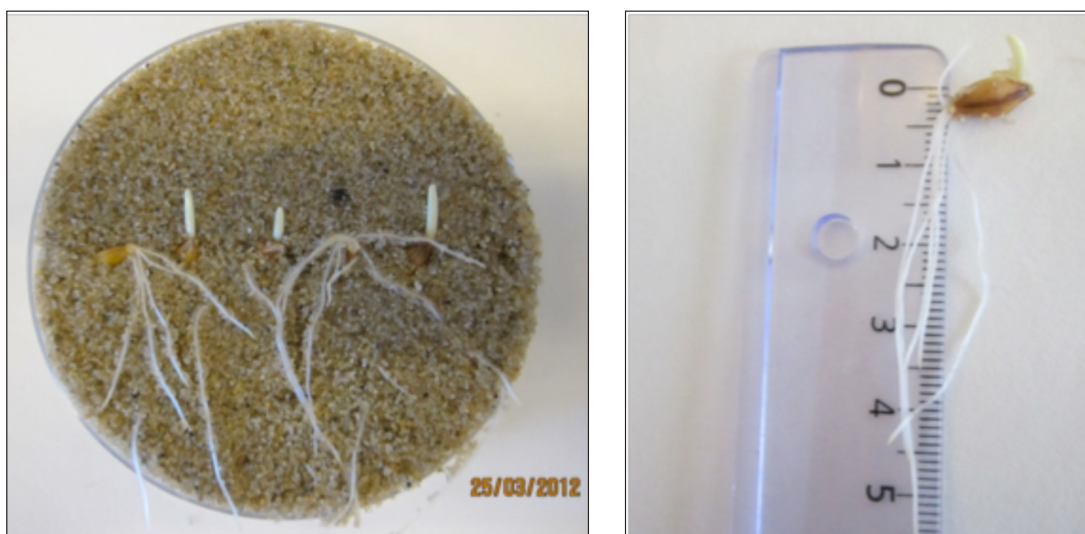
*Endast indikativt värde då koncentrationen faller utanför mätområdet

1.8 Groningshämmning

I groningshämmningstesten inkluderades serierna A, C, E och G, dvs. 24 och 6 timmar.

Ugnstorkade och mortlade delprover användes för test av groningshämmning av kornfrön (*Hordeum vulgare*) enligt US EPA OPPTS 850.4200. Slam i hexaplikater blandades med sand (ca. 0,2 g torkat slam / 100 g sand) och vatten i petriskålar och 5 frön tillsattes i var skål. Groningen av rötterna mättes med en linjal efter 72 h, och jämfördes med groningen av kontroller (sand utan slamtillsättning, n = 9) och groningshämmningen beräknades som

procenten av rötternas längd i slamblandningarna jämfört med längden hos rötterna i kontrollerna. En positiv kontroll (glyphosat 50 mg/l i vattenfasen) var inkluderad i alla försök och reproducerbarheten bestämdes till 11 % (n = 24, dvs. 120 rötter). Antalet rötter per frö blev också noterat.



Figur 1 Rötter från kornfrön i petriskål och vid mätning

2 Resultat och diskussion

2.1 Torrsubstans samt glödrest och -förlust.

För alla proverna utgör det organiska materialet (GF) en större del än det oorganiska (GR), tabell 3. Behandlingarna 6 och 7 skiljer sig statistiskt sett från behandlingarna 1–5 med 99 % säkerhet (TTEST, $p < 0.01$) och innehåller mer TS och har en högre fraktion organiskt material (GF).

Tabell 3 TS, GR och GF uttryckt i %

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-----|
| TS (% av total vikten) | | | | | | | |
| A | 1.2 | 2.1 | 2.3 | 2.1 | 1.7 | 3.7 | 3.5 |
| C | 2.1 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 4.1 | 4.3 |
| E | 2.2 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.1 | 4.1 | 4.1 |
| G | 2.2 | 2.4 | 2.5 | 2.3 | 2.1 | 4.1 | 4.1 |
| I | 2.1 | 2.3 | 2.4 | 2.3 | 1.7 | 3.9 (J) | 3.9 |
| K | 1.7 | 2.7 | 2.3 | 2.1 | 1.8 | 3.9 | 4.1 |
| GR (% av TS) | | | | | | | |
| A | 36 | 38 | 37 | 36 | 40 | 23 | 24 |
| C | 38 | 39 | 35 | 37 | 40 | 22 | 21 |
| E | 35 | 35 | 34 | 35 | 38 | 18 | 19 |
| G | 36 | 36 | 33 | 35 | 38 | 19 | 19 |
| I | 34 | 34 | 32 | 36 | 36 | 18 (J) | 18 |
| K | 34 | 39 | 31 | 36 | 35 | 18 | 17 |
| GF (% av TS) | | | | | | | |
| A | 64 | 62 | 63 | 64 | 60 | 77 | 76 |
| C | 62 | 61 | 65 | 63 | 60 | 78 | 79 |
| E | 65 | 65 | 66 | 65 | 62 | 82 | 81 |
| G | 64 | 64 | 67 | 65 | 62 | 81 | 81 |
| I | 66 | 66 | 68 | 64 | 64 | 82 (J) | 83 |
| K | 66 | 61 | 69 | 65 | 65 | 82 | 83 |

2.2 Metaller och spårelement

Främst förekommande är järn, magnesium, fosfor och svavel som återfanns i g/kg TS nivån, de andra metallerna och spårelementen uppmättes i mg/kg TS. Selen är endast kvantifierat i ett par prov och förekommer primär under detektionsgränsen (nd), Tabell 4.

Tabell 4 Metaller och spårelement angivna i mg/kg TS, där värdet 6l är från provflaska 6J

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------|-----|------|------|-----|-----|------|------|
| Arsenik As | | | | | | | |
| A | 8.6 | 8.3 | 7.5 | 7.6 | 9.1 | 6.4 | 6.3 |
| C | 7.5 | 6.9 | 7.5 | 7.0 | 8.8 | 3.4 | 6.5 |
| E | 7.7 | 7.8 | 7.2 | 6.7 | 6.7 | 4.5 | 2.3 |
| G | 5.2 | 4.7 | 7.0 | 8.1 | 8.2 | 4.2 | 4.3 |
| I | 6.3 | 6.9 | 5.1 | 7.8 | 7.7 | 3.8 | 3.5 |
| K | 6.9 | 6.1 | 5.7 | 5.7 | 7.1 | 3.3 | 3.2 |
| Kadmium Cd | | | | | | | |
| A | 1.5 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 2.3 | 0.61 | 0.92 |
| C | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 1.9 | 1.9 | 0.57 | 0.75 |
| E | 1.3 | 1.1 | 0.97 | 1.5 | 1.5 | 0.78 | 0.50 |
| G | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.5 | 1.4 | 0.58 | 0.56 |
| I | 1.1 | 0.86 | 0.93 | 1.3 | 1.2 | 0.54 | 0.51 |
| K | 1.2 | 1.0 | 0.98 | 1.1 | 1.3 | 0.62 | 0.47 |
| Kobolt Co | | | | | | | |
| A | 8.9 | 9.1 | 8.7 | 8.6 | 9.3 | 4.8 | 5.1 |
| C | 8.7 | 7.9 | 8.1 | 8.3 | 9.1 | 4.5 | 4.7 |
| E | 7.9 | 7.7 | 6.9 | 7.5 | 8.6 | 3.9 | 4.0 |
| G | 7.9 | 7.2 | 7.0 | 7.8 | 8.1 | 3.8 | 3.5 |
| I | 7.2 | 6.5 | 6.4 | 7.1 | 7.3 | 4.1 | 4.1 |
| K | 7.6 | 7.1 | 7.0 | 7.3 | 7.5 | 4.1 | 3.9 |
| Krom Cr | | | | | | | |
| A | 170 | 41 | 40 | 58 | 69 | 14 | 14 |
| C | 120 | 27 | 28 | 44 | 58 | 10 | 11 |
| E | 80 | 22 | 21 | 33 | 42 | 13 | 13 |
| G | 80 | 20 | 20 | 32 | 42 | 12 | 11 |
| I | 57 | 20 | 18 | 28 | 34 | 7.7 | 8.1 |
| K | 63 | 20 | 19 | 27 | 32 | 8.0 | 7.7 |
| Koppar Cu | | | | | | | |
| A | 428 | 484 | 763 | 507 | 516 | 291 | 302 |
| C | 590 | 463 | 481 | 505 | 532 | 266 | 278 |
| E | 468 | 455 | 437 | 468 | 495 | 252 | 270 |
| G | 687 | 446 | 437 | 471 | 492 | 247 | 228 |
| I | 451 | 434 | 417 | 467 | 460 | 245 | 247 |
| K | 478 | 415 | 449 | 462 | 455 | 246 | 238 |
| Järn Fe (g/kg) | | | | | | | |
| A | 63 | 74 | 71 | 70 | 72 | 43 | 43 |
| C | 69 | 71 | 68 | 69 | 73 | 41 | 37 |
| E | 64 | 57 | 60 | 66 | 66 | 31 | 31 |
| G | 64 | 62 | 60 | 64 | 68 | 30 | 29 |
| I | 59 | 57 | 54 | 60 | 59 | 33 | 32 |
| K | 59 | 61 | 59 | 60 | 62 | 33 | 31 |
| Magnesium Mg (g/kg) | | | | | | | |
| A | 5.2 | 4.5 | 4.4 | 4.4 | 5.0 | 3.2 | 3.2 |
| C | 4.7 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 3.1 | 2.7 |
| E | 4.6 | 4.2 | 4.2 | 4.6 | 4.5 | 2.9 | 2.6 |
| G | 4.5 | 4.6 | 4.4 | 4.5 | 4.8 | 2.9 | 3.3 |
| I | 4.5 | 4.6 | 4.3 | 4.5 | 4.8 | 2.2 | 2.3 |
| K | 4.6 | 4.6 | 4.8 | 4.5 | 4.7 | 2.4 | 2.2 |

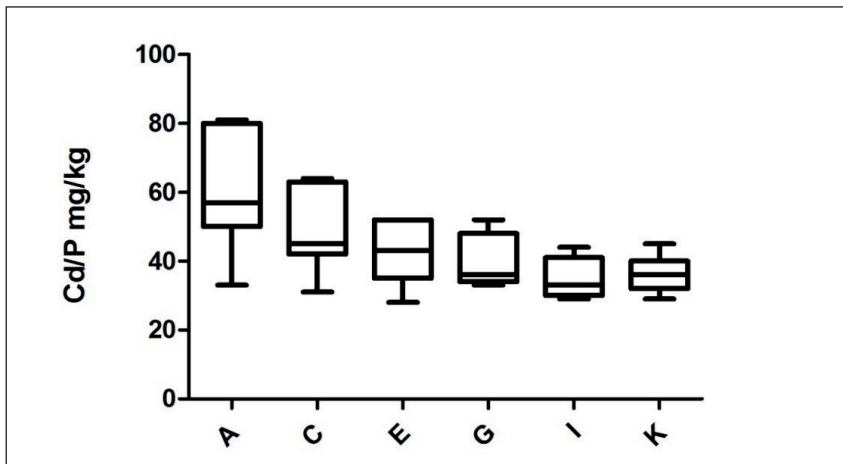
| | | | | | | | |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Mangan Mn | | | | | | | |
| A | 215 | 228 | 217 | 213 | 236 | 142 | 145 |
| C | 224 | 222 | 219 | 223 | 241 | 133 | 138 |
| E | 220 | 228 | 212 | 210 | 231 | 155 | 165 |
| G | 228 | 222 | 216 | 217 | 232 | 157 | 149 |
| I | 227 | 228 | 217 | 233 | 228 | 132 | 132 |
| K | 233 | 244 | 236 | 229 | 227 | 135 | 126 |
| Nickel Ni | | | | | | | |
| A | 91 | 25 | 22 | 27 | 35 | 16 | 15 |
| C | 64 | 21 | 19 | 24 | 32 | 11 | 12 |
| E | 49 | 20 | 17 | 21 | 27 | 13 | 9.9 |
| G | 46 | 19 | 17 | 24 | 27 | 13 | 11 |
| I | 35 | 19 | 15 | 20 | 25 | 9.9 | 25 |
| K | 39 | 19 | 19 | 19 | 24 | 12 | 14 |
| Fosfor P (g/kg) | | | | | | | |
| A | 26 | 30 | 28 | 28 | 28 | 19 | 19 |
| C | 29 | 30 | 29 | 29 | 30 | 19 | 17 |
| E | 29 | 26 | 27 | 29 | 29 | 18 | 18 |
| G | 29 | 29 | 28 | 28 | 30 | 17 | 17 |
| I | 29 | 29 | 28 | 29 | 28 | 17 | 17 |
| K | 29 | 31 | 31 | 29 | 30 | 18 | 16 |
| Bly Pb | | | | | | | |
| A | 35 | 39 | 40 | 41 | 37 | 23 | 24 |
| C | 37 | 36 | 35 | 40 | 39 | 16 | 17 |
| E | 33 | 30 | 29 | 34 | 34 | 12 | 16 |
| G | 33 | 28 | 29 | 33 | 34 | 11 | 11 |
| I | 27 | 24 | 24 | 31 | 28 | 11 | 9.4 |
| K | 28 | 23 | 24 | 30 | 28 | 11 | 12 |
| Svavel S (g/kg) | | | | | | | |
| A | 19 | 18 | 21 | 19 | 20 | 13 | 13 |
| C | 17 | 18 | 18 | 20 | 21 | 10 | 8.9 |
| E | 15 | 15 | 16 | 17 | 16 | 10 | 9.4 |
| G | 15 | 17 | 18 | 19 | 18 | 8.9 | 8.9 |
| I | 16 | 18 | 17 | 19 | 17 | 10 | 10 |
| K | 18 | 17 | 18 | 19 | 17 | 11 | 9.3 |
| Selen Se | | | | | | | |
| A | < 1 | < 1 | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d |
| C | < 1 | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d |
| E | n.d | n.d | n.d | n.d | < 1 | n.d | n.d |
| G | n.d | n.d | n.d | 1.3 | n.d | n.d | n.d |
| I | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d |
| K | n.d | 1.6 | < 1 | < 1 | n.d | n.d | n.d |
| Zink Zn | | | | | | | |
| A | 681 | 761 | 880 | 835 | 830 | 437 | 452 |
| C | 766 | 698 | 689 | 775 | 802 | 358 | 337 |
| E | 659 | 559 | 582 | 696 | 695 | 346 | 350 |
| G | 748 | 611 | 596 | 679 | 717 | 324 | 304 |
| I | 607 | 585 | 568 | 636 | 623 | 332 | 334 |
| K | 621 | 590 | 614 | 630 | 651 | 325 | 318 |

Även för metaller och spårelement skiljer sig 6 och 7 från 1–5, men då värdena är normaliserade till TS är detta en logisk följd.

Halterna i det analyserade slammet klarar de danska kraven på slamkvalitet för 3 av metallerna, koppar, bly och zink (Cu 1 000, Pb, 120, Zn 4 000 mg/kg), Tabell 4, men överskrider gränsvärdena för kadmium, nickel och krom (Slambekendtgörelsen, 2006). För kadmium (Cd 0.8 mg/kg) överskrider flertalet av proverna gränsvärdet, medan för nickel och krom är det prover från 1-serien (Cr 100, Ni 30) som ligger över.

Kvoten mellan kadmium och fosfor faller från 59 mg/kg (A) till 36 mg/kg (I och K), Figur 2, vilket i båda tillfällena är under det danska gränsvärdet

på 100 mg Cd/kg P (Slambekendtgørelsen, 2006). Generellt har A-serien och 1-serien högre metallinnehåll än de efterföljande serierna och då det inte kan kopplas till TS eller GR kan det bero på en initial metallförorening i reaktorer eller provtagningskärl.



Figur 2 Kadmium per kilo fosfor från de olika serierna.

2.3 PAH

Uppmätta PAH koncentrationer är angivna i mg/kg TS, Tabell 5. Värden i rött indikerar koncentrationer under kvantifikationsgränsen. Det 95 procentiga konfidensintervallet från kalibreringskurvorna inkluderat. För naphthalenen, acenaphthene, acenaphthylene, och benzo[a]pyrene, låg samtliga prov under kvantifikationsgränserna enligt tabell 1 och är därmed inte rapporterade här.

Tabell 5a PAH; uppmätta PAH-er i behandlat slam förekommande över kvantifikationsgränsen

| Fluoranthene | | | | | | | |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.55 ^{0.59} _{0.51} | 0.51 ^{0.55} _{0.47} | 0.66 ^{0.70} _{0.62} | 0.60 ^{0.64} _{0.56} | 0.51 ^{0.55} _{0.46} | 0.22 ^{0.26} _{0.17} | 0.26 ^{0.31} _{0.22} |
| 6h (F) | 0.49 ^{0.54} _{0.45} | 0.49 ^{0.53} _{0.45} | 0.48 ^{0.53} _{0.44} | 0.54 ^{0.58} _{0.50} | 0.51 ^{0.55} _{0.47} | 0.16 ^{0.21} _{0.12} | 0.15 ^{0.20} _{0.11} |
| 2.5h (J) | 0.46 ^{0.51} _{0.42} | 0.48 ^{0.53} _{0.44} | 0.48 ^{0.53} _{0.44} | 0.48 ^{0.53} _{0.44} | 0.54 ^{0.59} _{0.50} | 0.15 ^{0.20} _{0.10} | 0.16 ^{0.21} _{0.12} |
| 2h (L) | 0.43 ^{0.47} _{0.39} | 0.35 ^{0.39} _{0.31} | 0.38 ^{0.42} _{0.33} | 0.38 ^{0.48} _{0.40} | 0.49 ^{0.54} _{0.45} | 0.08 ^{0.13} _{0.04} | 0.18 ^{0.22} _{0.13} |
| Phenanthrene | | | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.47 ^{0.50} _{0.43} | 0.45 ^{0.48} _{0.41} | 0.49 ^{0.52} _{0.45} | 0.48 ^{0.51} _{0.44} | 0.43 ^{0.47} _{0.40} | 0.15 ^{0.19} _{0.11} | 0.16 ^{0.19} _{0.12} |
| 6h (F) | 0.34 ^{0.37} _{0.30} | 0.36 ^{0.39} _{0.32} | 0.32 ^{0.35} _{0.28} | 0.37 ^{0.40} _{0.33} | 0.39 ^{0.42} _{0.35} | 0.11 ^{0.14} _{0.07} | 0.10 ^{0.14} _{0.06} |
| 2.5h (J) | 0.34 ^{0.37} _{0.30} | 0.31 ^{0.35} _{0.28} | 0.34 ^{0.38} _{0.31} | 0.34 ^{0.37} _{0.30} | 0.44 ^{0.47} _{0.40} | 0.12 ^{0.15} _{0.08} | 0.13 ^{0.16} _{0.09} |
| 2h (L) | 0.32 ^{0.36} _{0.29} | 0.26 ^{0.29} _{0.22} | 0.26 ^{0.30} _{0.23} | 0.31 ^{0.35} _{0.28} | 0.45 ^{0.48} _{0.41} | 0.06 ^{0.10} _{0.02} | 0.10 ^{0.13} _{0.06} |
| Pyrene | | | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.41 ^{0.44} _{0.39} | 0.44 ^{0.47} _{0.41} | 0.56 ^{0.59} _{0.53} | 0.54 ^{0.56} _{0.51} | 0.43 ^{0.46} _{0.40} | 0.19 ^{0.22} _{0.16} | 0.22 ^{0.25} _{0.19} |
| 6h (F) | 0.42 ^{0.45} _{0.39} | 0.41 ^{0.44} _{0.38} | 0.42 ^{0.45} _{0.40} | 0.52 ^{0.54} _{0.49} | 0.50 ^{0.53} _{0.48} | 0.16 ^{0.18} _{0.13} | 0.15 ^{0.18} _{0.13} |
| 2.5h (J) | 0.40 ^{0.42} _{0.37} | 0.46 ^{0.48} _{0.43} | 0.47 ^{0.49} _{0.44} | 0.44 ^{0.47} _{0.41} | 0.48 ^{0.51} _{0.45} | 0.13 ^{0.16} _{0.11} | 0.15 ^{0.18} _{0.12} |
| 2h (L) | 0.39 ^{0.42} _{0.36} | 0.34 ^{0.37} _{0.31} | 0.37 ^{0.40} _{0.35} | 0.42 ^{0.47} _{0.39} | 0.48 ^{0.51} _{0.45} | 0.08 ^{0.11} _{0.05} | 0.17 ^{0.20} _{0.14} |

Tabell 5b PAH; uppmätta PAH-er i behandlat slam under kvantifikationsgränsen (men detekterbara)

| Anthracene | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.17 ^{0.20} _{0.13} | 0.15 ^{0.19} _{0.11} | 0.19 ^{0.22} _{0.15} | 0.18 ^{0.21} _{0.14} | 0.17 ^{0.21} _{0.13} | 0.09 ^{0.13} _{0.05} | 0.09 ^{0.13} _{0.05} |
| 6h (F) | 0.17 ^{0.21} _{0.13} | 0.18 ^{0.22} _{0.14} | 0.16 ^{0.20} _{0.12} | 0.17 ^{0.21} _{0.14} | 0.18 ^{0.21} _{0.14} | 0.08 ^{0.11} _{0.04} | 0.08 ^{0.11} _{0.04} |
| 2.5h (J) | 0.17 ^{0.21} _{0.13} | 0.17 ^{0.20} _{0.13} | 0.18 ^{0.22} _{0.13} | 0.16 ^{0.20} _{0.13} | 0.20 ^{0.23} _{0.16} | 0.08 ^{0.12} _{0.04} | 0.10 ^{0.14} _{0.06} |
| 2h (L) | 0.15 ^{0.19} _{0.11} | 0.13 ^{0.17} _{0.09} | 0.15 ^{0.18} _{0.11} | 0.16 ^{0.19} _{0.12} | 0.18 ^{0.22} _{0.14} | 0.08 ^{0.11} _{0.05} | 0.09 ^{0.13} _{0.05} |
| Fluorene | | | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.09 ^{0.13} _{0.05} | 0.09 ^{0.13} _{0.06} | 0.11 ^{0.14} _{0.06} | 0.10 ^{0.14} _{0.07} | 0.12 ^{0.15} _{0.08} | 0.04 ^{0.08} _{0.00} | 0.02 ^{0.06} _{0.00} |
| 6h (F) | 0.07 ^{0.10} _{0.03} | 0.06 ^{0.09} _{0.03} | 0.06 ^{0.10} _{0.02} | 0.08 ^{0.11} _{0.08} | 0.10 ^{0.16} _{0.07} | 0.03 ^{0.07} _{0.00} | 0.02 ^{0.06} _{0.00} |
| 2.5h (J) | 0.07 ^{0.11} _{0.03} | 0.06 ^{0.10} _{0.03} | 0.07 ^{0.10} _{0.03} | 0.07 ^{0.11} _{0.03} | 0.06 ^{0.10} _{0.02} | 0.04 ^{0.08} _{0.00} | 0.05 ^{0.09} _{0.01} |
| 2h (L) | 0.06 ^{0.10} _{0.03} | 0.05 ^{0.09} _{0.02} | 0.05 ^{0.09} _{0.02} | 0.06 ^{0.11} _{0.03} | 0.11 ^{0.14} _{0.07} | 0.08 ^{0.11} _{0.05} | 0.02 ^{0.06} _{0.00} |
| Benzo[a]anthracene | | | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.18 ^{0.25} _{0.11} | 0.19 ^{0.26} _{0.12} | 0.27 ^{0.34} _{0.20} | 0.24 ^{0.31} _{0.17} | 0.20 ^{0.26} _{0.13} | 0.10 ^{0.17} _{0.02} | 0.11 ^{0.18} _{0.04} |
| 6h (F) | 0.19 ^{0.26} _{0.12} | 0.19 ^{0.26} _{0.12} | 0.19 ^{0.26} _{0.12} | 0.23 ^{0.30} _{0.16} | 0.22 ^{0.29} _{0.15} | 0.08 ^{0.15} _{0.01} | 0.08 ^{0.15} _{0.00} |
| 2.5h (J) | 0.17 ^{0.24} _{0.10} | 0.18 ^{0.25} _{0.11} | 0.20 ^{0.27} _{0.13} | 0.21 ^{0.28} _{0.14} | 0.22 ^{0.29} _{0.15} | 0.06 ^{0.13} _{0.00} | 0.07 ^{0.14} _{0.01} |
| 2h (L) | 0.15 ^{0.22} _{0.08} | 0.15 ^{0.22} _{0.08} | 0.17 ^{0.24} _{0.10} | 0.18 ^{0.25} _{0.11} | 0.19 ^{0.26} _{0.12} | 0.03 ^{0.10} _{0.00} | 0.09 ^{0.16} _{0.02} |

Tabell 5c PAH; uppmätta PAH-er i behandlat slam utan statistiskt fastställda kvantifikationsgränser

| Chrysene | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.23 ^{0.31} _{0.14} | 0.23 ^{0.31} _{0.14} | 0.34 ^{0.42} _{0.25} | 0.29 ^{0.37} _{0.21} | 0.24 ^{0.33} _{0.17} | 0.13 ^{0.22} _{0.04} | 0.13 ^{0.22} _{0.04} |
| 6h (F) | 0.24 ^{0.33} _{0.17} | 0.24 ^{0.33} _{0.17} | 0.25 ^{0.33} _{0.16} | 0.30 ^{0.38} _{0.21} | 0.28 ^{0.36} _{0.19} | 0.11 ^{0.20} _{0.02} | 0.11 ^{0.20} _{0.03} |
| 2.5h (J) | 0.23 ^{0.31} _{0.14} | 0.24 ^{0.33} _{0.17} | 0.26 ^{0.35} _{0.16} | 0.26 ^{0.35} _{0.18} | 0.27 ^{0.36} _{0.19} | 0.09 ^{0.18} _{0.01} | 0.10 ^{0.19} _{0.01} |
| 2h (L) | 0.20 ^{0.29} _{0.12} | 0.20 ^{0.28} _{0.12} | 0.22 ^{0.31} _{0.13} | 0.24 ^{0.33} _{0.17} | 0.26 ^{0.34} _{0.17} | 0.06 ^{0.15} _{0.00} | 0.12 ^{0.15} _{0.00} |
| Benzo[g,h,i]perylene | | | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.39 ^{0.63} _{0.12} | 0.41 ^{0.65} _{0.14} | 0.50 ^{0.74} _{0.25} | 0.42 ^{0.66} _{0.15} | 0.38 ^{0.62} _{0.11} | 0.32 ^{0.57} _{0.06} | 0.34 ^{0.59} _{0.07} |
| 6h (F) | 0.40 ^{0.64} _{0.13} | 0.39 ^{0.64} _{0.13} | 0.40 ^{0.65} _{0.14} | 0.43 ^{0.68} _{0.17} | 0.42 ^{0.66} _{0.16} | 0.32 ^{0.56} _{0.05} | 0.33 ^{0.57} _{0.06} |
| 2.5h (J) | 0.38 ^{0.63} _{0.12} | 0.40 ^{0.64} _{0.13} | 0.42 ^{0.67} _{0.16} | 0.43 ^{0.67} _{0.17} | 0.43 ^{0.67} _{0.17} | 0.30 ^{0.54} _{0.02} | 0.32 ^{0.56} _{0.05} |
| 2h (L) | 0.36 ^{0.61} _{0.10} | 0.38 ^{0.62} _{0.11} | 0.43 ^{0.68} _{0.16} | 0.41 ^{0.65} _{0.15} | 0.43 ^{0.70} _{0.17} | 0.28 ^{0.52} _{0.00} | 0.33 ^{0.58} _{0.07} |
| Indeno[1,2,3-cd]pyrene + dibenz[a,h]anthracene | | | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.39 ^{0.68} _{0.07} | 0.41 ^{0.70} _{0.10} | 0.51 ^{0.79} _{0.19} | 0.42 ^{0.71} _{0.11} | 0.39 ^{0.68} _{0.07} | 0.35 ^{0.64} _{0.03} | 0.35 ^{0.64} _{0.03} |
| 6h (F) | 0.41 ^{0.70} _{0.09} | 0.41 ^{0.70} _{0.09} | 0.41 ^{0.70} _{0.10} | 0.44 ^{0.73} _{0.13} | 0.43 ^{0.72} _{0.11} | 0.34 ^{0.63} _{0.01} | 0.34 ^{0.63} _{0.01} |
| 2.5h (J) | 0.39 ^{0.68} _{0.07} | 0.41 ^{0.70} _{0.10} | 0.43 ^{0.72} _{0.11} | 0.44 ^{0.73} _{0.13} | 0.44 ^{0.73} _{0.13} | 0.33 ^{0.62} _{0.01} | 0.33 ^{0.62} _{0.01} |
| 2h (L) | 0.38 ^{0.66} _{0.06} | 0.39 ^{0.68} _{0.07} | 0.43 ^{0.72} _{0.11} | 0.42 ^{0.71} _{0.10} | 0.44 ^{0.72} _{0.12} | 0.31 ^{0.60} _{0.00} | 0.35 ^{0.64} _{0.03} |

Tabell 5c Fortsättning

| Benzo(b)fluoranthene | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
| 24h (B) | 0.23 ^{0.37} _{0.07} | 0.24 ^{0.39} _{0.09} | 0.36 ^{0.37} _{0.07} | 0.29 ^{0.44} _{0.14} | 0.26 ^{0.40} _{0.10} | 0.16 ^{0.31} _{0.00} | 0.16 ^{0.31} _{0.00} |
| 6h (F) | 0.25 ^{0.40} _{0.10} | 0.25 ^{0.39} _{0.09} | 0.25 ^{0.37} _{0.07} | 0.30 ^{0.45} _{0.15} | 0.29 ^{0.44} _{0.14} | 0.14 ^{0.29} | 0.14 ^{0.29} |
| 2.5h (J) | 0.22 ^{0.36} _{0.06} | 0.24 ^{0.38} _{0.08} | 0.26 ^{0.37} _{0.07} | 0.27 ^{0.41} _{0.12} | 0.28 ^{0.42} _{0.12} | 0.12 ^{0.27} | 0.14 ^{0.28} |
| 2h (L) | 0.19 ^{0.34} _{0.04} | 0.21 ^{0.36} _{0.05} | 0.22 ^{0.37} _{0.07} | 0.24 ^{0.39} _{0.09} | 0.27 ^{0.42} _{0.12} | 0.09 ^{0.24} | 0.15 ^{0.30} |

Tabell 6 Summan av åtta utav de PAH-er* som är med i den danska lagstiftningen

| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) | Undigested (6) | Digested (7) |
|----------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 24h (B) | 2.6 | 2.6 | 3.2 | 3.1 | 2.5 | 1.4 | 1.5 |
| 6h (F) | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 1.3 | 1.2 |
| 2.5h (J) | 2.3 | 2.0 | 2.5 | 2.5 | 2.7 | 1.2 | 1.3 |
| 2h (L) | 2.1 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 2.7 | 0.91 | 1.3 |

* Slambekendtgørelsen: Acenaphthene, Phenanthrene, Fluorene, Fluoranthene, Pyren, Benzo(b+j+k) fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Benzo(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene.

Av de enskilda PAH-erna är det endast Phenanthrene, Fluoranthene, Pyrene som har alla värden över kvantifikationsgränserna och därmed kan testas statistiskt med ANOVA. Av dessa ses en skillnad för Phenanthrene, där det är en signifikant stigning i PAH koncentrationen (mg/kg TS) med exponeringstiden (2–24 h duration), men ingen skillnad för någon av PAH-erna vid de olika behandlingarna (treatment). Summan av de kvantifierade PAH-erna, tabell 6, visar att längden på experimentet (B, F, J och L) påverkar koncentrationen då 2-timmarsproverna har lägre halter än 24-timmarsproverna, och för 1–5 är det en statistisk skillnad ($p < 0.01$). Troligen beror det på att mikroorganismerna konsumerar de lätt nedbrytbara ämnena först och därmed anrikas PAH-erna i reaktorerna och får därmed en tillsynes stigning i koncentrationen. För de olika behandlingarna (1–5, respektive 6–7) är det dock ingen statistisk skillnad i summakoncentrationen. Ingen skillnad mellan 7 respektive 15 dygn kunde fastställas.

Summan ligger under gränsvärdet för PAH i slam i Danmark (3 mg/kg Slambekendtgørelsen, 2006), men vid två tillfällen över (B3 och B4), det är dock under det föreslagna gränsvärdet inom EU (6 mg/kg Circa, 2010).

2.4 PCB

Uppmätta PCB koncentrationer anges i µg/kg TS i tabell 4. Värden i rött indikerar koncentrationer under kvantifikationsgränsen och nd., indikerar att inget detekterats. Serie 1 och 2 indikerar provserier (dvs. frystorkning, finfördelning, extraktion och rening samt analys) och de individuella provernas koncentration.

Analyserna av PCB-erna anses som misslyckade då serie 1 och 2 inte överensstämmer och de få uppmätta koncentrationerna verkar vara helt slumpmässiga. Detta beror antagligen på att materialet inte var torrt nog efter frystorkningen, vilket till en hög grad påverkade extraktionen då extraktionen gjordes med hexan, vilket är ett opolärt lösningsmedel. PAH-

erna extraherades med gott resultat på samma prover men här användes en blandning av hexan och aceton. Aceton är ett mellanpolärt lösningsmedel vilket möjliggör extraktion då det finns vattenrester kvar i slamstrukturen. Certifierat slam innehållande PCB resuspenderades i vatten och frystorkades och användes som extraktionskontroll med gott resultat men då detta hade en annorlunda textur, har det antagligen varit lättare att frystorka och därmed möjliggjort extraktionen. Om projektet ska återupptas eller proverna analyseras igen måste vi hitta en ny samarbetspart med en tillförlitlig frystork eller köpa in vår egen. I projektet gjordes frystorkningen i samarbete med en annan institution på DTU.

Tabell 7 PCB; uppmätta PCB-er i behandlat slam, men analyserna kan inte anses pålitliga

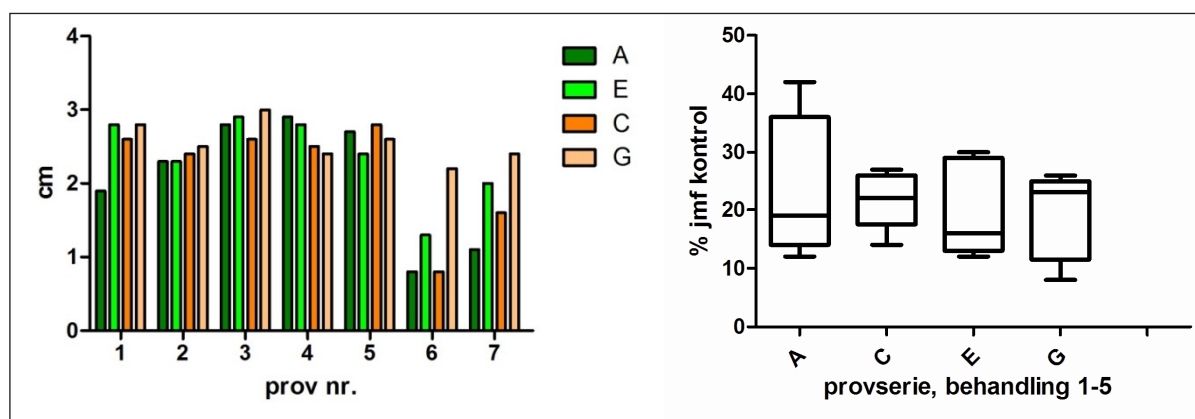
| PCB 28 Serie 1 | | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2h (L) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 28 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | 3,8 | 28,8 | 20,1 | n. d |
| 6h (F) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 52 Serie 1 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | 9,2 | 6,9 | 8,0 | 4,1 |
| 6h (F) | 5,3 | 5,1 | 5,5 | 5,0 | 6,1 |
| 2.5h (J) | 12,3 | 19,9 | 11,2 | 21,6 | 25,7 |
| 2h (L) | 17,6 | 12,3 | 14,3 | 12,3 | 20,9 |
| PCB 52 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | 6,7 | 6,6 | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 101 Serie 1 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | 5,5 | 5,7 | 6,1 | 2,9 |
| 6h (F) | 5,0 | n. d | 4,5 | 3,8 | 4,4 |
| 2.5h (J) | 8,8 | 8,1 | 4,8 | 9,9 | 13,6 |
| 2h (L) | 8,9 | 6,5 | 5,6 | 6,9 | 7,9 |
| PCB 101 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | 4,5 | 3,5 | n. d | 5,3 | n. d |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |

| PCB 118 Serie 1 | | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | 5,2 | n. d | 4,8 | 5,6 | 6,4 |
| 2h (L) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 118 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 138 Serie 1 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | 6,5 | 7,7 | 7,8 | n. d |
| 6h (F) | 4,5 | n. d | 4,5 | n. d | 4,6 |
| 2.5h (J) | 5,5 | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2h (L) | 5,7 | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 138 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | 6,4 | n. d | n. d | n. d | 8,0 |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 153 Serie 1 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | 10,7 | 11,0 | 11,2 | 4,8 |
| 6h (F) | 8,0 | 7,0 | 7,6 | 6,8 | 6,8 |
| 2.5h (J) | 9,2 | 6,9 | 6,7 | 9,1 | 8,5 |
| 2h (L) | 10,3 | 10,3 | 12,2 | 15,1 | 12,4 |
| PCB 153 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | 9,6 | 9,7 | 7,9 | 11,9 | 11,8 |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 180 Serie 1 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | 6,4 | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | 4,8 | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2h (L) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| PCB 180 Serie 2 | | | | | |
| Duration | 55°C 15d (1) | 55°C 7d (2) | 60°C 7d (3) | 60°C 15d (4) | 35°C 15d (5) |
| 24h (B) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 6h (F) | 5,4 | n. d | n. d | n. d | n. d |
| 2.5h (J) | n. d | n. d | n. d | n. d | n. d |

2.5 Groningshämning

Alla slamprover, normaliserade efter den tillsatta mängden slam, inhiberade kornväxten i jämförelse med sandreferensproverna. För de mätta rotlängderna är proverna 6 och 7 statistiskt kortare än för alla de andra behandlingarna (1–5), Figur 3, dvs. deras växt inhiberas mer, och mest inhiberande är 6-serien (62 %), följt av 7-serien (46 %). Det är därmed bättre att röta slammet än att använda det orötat.

Det är dock ingen statistisk skillnad mellan 24 (A och C) och 6 (E och G) timmarsbehandlingarna, så det uppnås ingen ytterligare växtförbättring med att röta längre än 6 timmar. A och C hämmar 24 respektive 28 % och E och G 14 och 19 %, Figur 4.



Figur 3 Genomsnittliga rotlängder uppmätta för A, C (24 h) och E, G (6 h).

Figur 4 Groningshämning

3 Uppsummering och Slutsatser

- Då delproverna har varit små föreligger det fortfarande provmaterial i fryst form.
- PCB-analyserna kan inte ses pålitliga, och inga värden bör rapporteras.
- Proverna 6 och 7 är statistiskt sett lika, men skiljer sig från proverna 1–5, och kan därmed inte betraktas som nollprover.
- Det organiska materialet utgör för alla prover en större del än det oorganiska, men 6 och 7 innehåller procentuellt mest TS och har en högre fraktion organiskt material.
- De uppmätta metall- och spårelementnivåerna klarar de danska gränsvärdena för Cu, Pb och Zn.
- Slammets nivåer av kadmium, nickel och krom överskrider de danska gränsvärdena.
- A och 1-serierna innehåller generellt de högsta nivåerna av metaller och spårelement och en initial förorening av reaktorer och provtagningsmaterial kan inte uteslutas.
- Fluoranthene, Phenanthrene och Pyrene är de PAH-er som förekommer i de högsta halterna i slamproverna.
- Det ses ingen statistisk skillnad PAH-koncentrationerna mellan de olika behandlingarna (35, 55 och 60 °C), dvs. förhöjd temperatur ger ingen synbar ökad nedbrytning.

- Vid jämförande av de olika uppehållstiderna (2, 2.5, 6 och 24 timmar) ses det en ackumulation över tid och PAH-erna tros anrikas i reaktorerna.
- Det ses ingen statistisk skillnad mellan PAH-erna i proverna behandlade vid 7 respektive 14 dygn.
- Summan av PAH ligger vid eller under gränsvärdena, men vid 24-timmarsproverna överskrider gränsen på 3 mg/kg.
- Alla slamprover inhiberar groningen mer än ren sand, men örötade slam inhiberar kraftigare än rötade slam, så anaerob behandling utgör en förbättring.

Referenser

Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål
(Slambekendtgørelsen) BEK nr 1650 af 13/12/2006, Retsinformation.dk

Circa, 2010. WORKING DOCUMENT SLUDGE AND BIOWASTE
21 SEPTEMBER 2010, BRUSSELS, online http://circa.europa.eu/Public/irc/env/rev_sewage/library

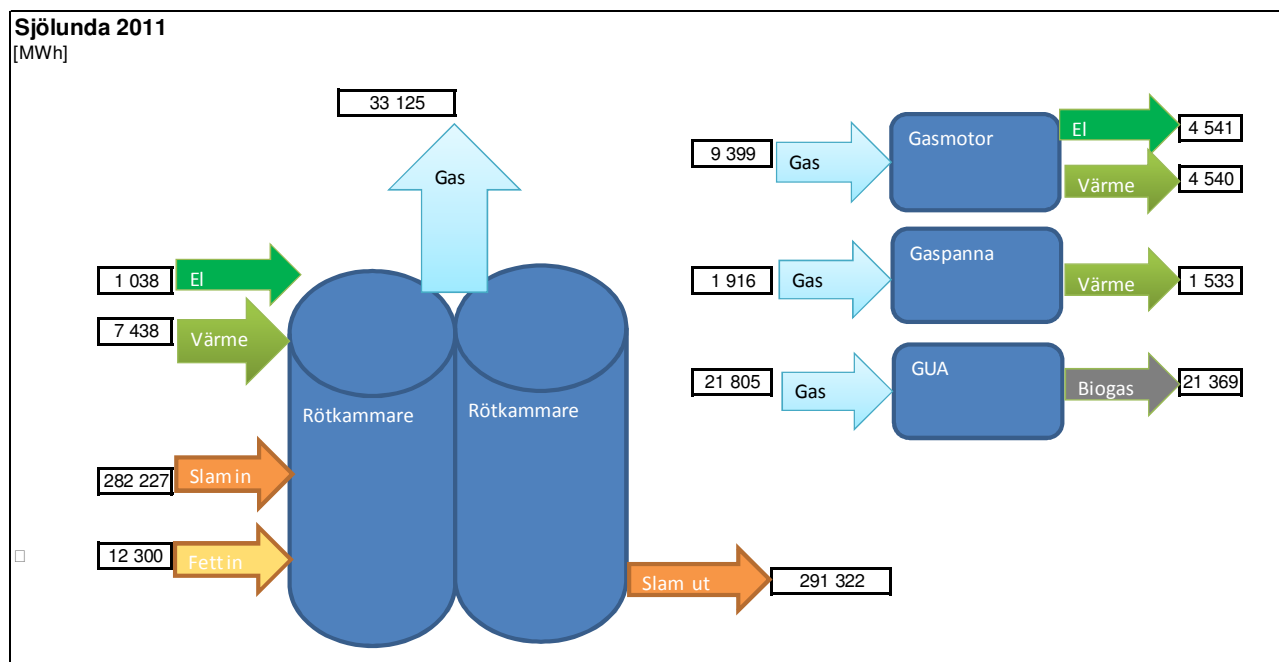
Winslow, SD; Pepich BV; Martin, JJ; Hallberg, GR; Munch, DJ; Frebis, CP; Hedrick, EJ; Krop, RA. *Statistical procedures for determination and verification of minimum reporting levels for drinking water methods*. Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 281–288

Appendix E.

Energibalans – Sjölunda Reningsverk, Malmö

Antaganden som gjorts vid beräkningarna:

- Elförbrukning anses konstant oberoende av temperatur i rötkammaren.
- Data för Sjölunda 2011 och juni 2012 är uppmätta värden. Pilotförsöken är beräknade värden, dvs uppmätta metanutbyten har applicerats på den mängd slam som rötas i fullskala.
- Beräkningarna förutsätter att pilotförsöken är uppskalningsbara till de förutsättningar som finns för Sjölundas rötkammaredrift.
- Beräkning av återvinning av energi genom värmeåterväxling efter termofil rötning har endast genomförts ner till 30 grader på utgående slam beroende på att rektvattenbehandlingsanläggningen kräver varmt vatten för att fungera optimalt.
- Beräkning av återvinning av energi genom värmeåterväxling efter hygieniseringssteget (70 grader) har genomförts ner till 35 grader på inkommande slam till mesofil rötning.



Figur E-1 Energibalans över rötkammare vid Sjölunda Avloppsreningsverk. Slam in och ut är angivet i m³/år.
GUA = Gasuppgaderingsanläggning (till fordonsbränslekvalitet)



Box 47607, 117 94 Stockholm
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se